

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

"DISEÑO Y ANÁLISIS DEL SISTEMA DE
ADMISIÓN PARA UN MONOPLAZA DE
FORMULA STUDENT"

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre - 2024

AUTOR: Pascual López Gomis

DIRECTORES: Óscar Cuadrado Sempere
Fernando Verdú Bernabéu



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está dedicado a mis padres, quienes me enseñaron la importancia del esfuerzo y el sacrificio. Sin ellos no sería nada de lo que soy. Siento que nunca podré agradecerlos lo que hacéis por mí. Gracias por enseñarme a ver la vida de esta forma, por vuestro cariño, vuestra infinita paciencia y vuestras enseñanzas.

A mi hermana, por su apoyo incondicional e incansable amor. Porque sé que siempre estarás a mi lado sin importar lo que pase.

A mis amigos, especialmente a Carlos, a Toni y a Diego, porque sin vosotros este camino no hubiera sido lo mismo. Por tantos momentos inolvidables de risas y alegrías. También por aquellos de enfados y frustraciones. Podemos decir que ha merecido la pena.

También a Fernando Verdú y a Óscar Cuadrado por acceder a tutorizar este proyecto.



RESUMEN

En este trabajo de fin de grado se diseña y analiza el sistema de admisión de aire para un motor de *Honda CBR600 RR* que irá instalado en el primer monoplaza del *Illici Racing Team*, el equipo de Formula Student de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Para ello se realiza el diseño 3D del sistema usando software CAD paramétrico y posteriormente se simula con el software de análisis unidimensional de motores Ricardo Wave. Finalmente, se compara cómo afecta al rendimiento del motor los cambios en el volumen del plenum y en la longitud de los runners de admisión.

Este trabajo no busca solamente garantizar el correcto funcionamiento del motor sino también, debido a la reciente creación del equipo, sentar las bases de diseño para futuros estudios y adaptaciones del sistema. Todo ello se realiza a partir de una base teórica resultante de la revisión bibliográfica de apuntes propios de la UMH, artículos de investigación y otros trabajos de fin de grado.



ABSTRACT

In this final degree thesis, we design and analyze the air intake system for a *Honda CBR600 RR* engine that will be mounted in the first single-seater of the *Illici Racing Team*, the Formula Student team of the Universidad Miguel Hernández de Elche.

For this purpose, the system is designed in 3D using the parametric CAD software Autodesk Inventor and then simulated with the Ricardo Wave one-dimensional engine analysis software. Finally, a comparison is made of how changes in plenum volume and intake runner length affect engine performance.

This work does not only aim to ensure the correct operation of the engine but also, due to the recent creation of the team, to lay the design foundations for future studies and adaptations of the system. All of this is based on a theoretical basis resulting from the bibliographical review of UMH's courses notes, research articles and other final degree thesis.



ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	9
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE GRÁFICAS	12
1. ANTECEDENTES	13
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	13
1.2 OBJETO.....	13
1.3 ALCANCE.....	13
2 COMPETICIÓN FORMULA STUDENT	15
2.1 FORMULA STUDENT.....	15
2.1.1 INSPECCIONES TÉCNICAS.....	16
2.1.2 EVENTOS DINÁMICOS.....	17
2.1.3 EVENTOS ESTÁTICOS.....	23
2.2 NORMATIVA FS.....	25
2.2.1 [CV 1.1] LIMITACIÓN DE MOTOR.....	25
2.2.2 [CV 1.3] SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE.....	25
2.2.3 [CV 1.4] ACELERADOR.....	26
2.2.4 [CV 1.7] <i>RESTRICTOR</i> DEL SISTEMA DE AIRE O BRIDA DE ADMISIÓN.....	26
3 LA ADMISIÓN Y SU IMPORTANCIA EN LOS MCIA	28
3.1 CONCEPTO DE MCIA.....	28
3.2 HISTORIA DE LOS MCIA DE 4 TIEMPOS.....	29
3.3 TIEMPOS DEL MOTOR DE 4T.....	30
3.3.1 ADMISIÓN.....	30
3.3.2 COMPRESIÓN.....	30
3.3.3 EXPANSIÓN.....	31
3.3.4 ESCAPE.....	31
3.4 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO.....	31
3.4.1 POTENCIA.....	31
3.4.2 PAR.....	33
3.4.3 RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO.....	33
3.5 RENOVACIÓN DE LA CARGA.....	36
3.5.1 DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN.....	37

3.6 EL SISTEMA DE ADMISIÓN EN LA FS.....	38
3.6.1 PLENUM	41
3.6.2 RUNNERS	44
3.6.3 RESONADOR DE HELMHOLTZ	45
4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE LA ADMISIÓN PARA FS.....	47
4.1 NECESIDAD DE CAMBIO DEL DISEÑO DE LA ADMISIÓN ORIGINAL.....	47
4.2 LONGITUD DE HELMHOLTZ	48
4.3 ESPACIO DISPONIBLE EN EL MONOPLAZA.....	52
5. MATERIALES UTILIZADOS PARA SISTEMAS DE ADMISIÓN	54
5.1 HIERRO FUNDIDO.....	55
5.2 ALUMINIO	55
5.3 ABS.....	55
5.3.1 FUSED DEPOSITION MODELLING	56
5.4 OTROS MATERIALES	56
6. DISEÑO CAD.....	58
7. SIMULACIÓN 1D – RICARDO WAVE.....	60
7.1 ELEMENTOS ADAPTADOS	62
7.2 ELEMENTOS MECÁNICOS	63
7.2.1 BLOQUE MOTOR	63
7.3 ELEMENTOS DE FLUJO	64
7.3.1 CILINDROS.....	65
7.3.2 RESTRICTOR	65
7.3.3 VÁLVULAS.....	66
7.3.4 INYECTORES	66
7.3.5 UNIONES EN FORMA DE Y.....	67
7.3.6 ELEMENTO AMBIENTE.....	68
7.4 GEOMETRÍA IMPORTADA DE LA ADMISIÓN	69
7.5 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DEL MOTOR.....	70
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
8.1 VARIACIÓN LONGITUD DE LOS RUNNERS	81
8.2 VARIACIÓN DEL VOLUMEN DEL PLENUM.....	83
9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	86

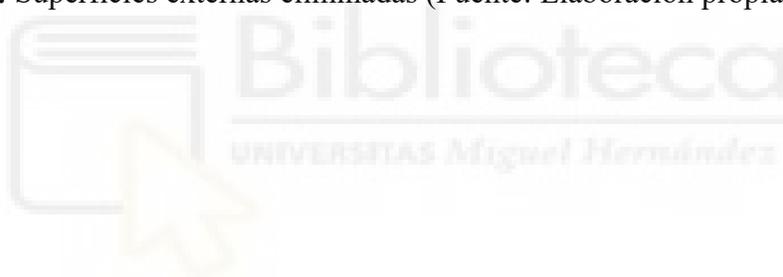
ANEXOS	88
ANEXO 1: MODELADO DE LA GEOMETRÍA	88
ANEXO 2: PLANOS	93
BIBLIOGRAFÍA	94



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Tilt test (Fuente: HofSpannung Motorsport)	17
Ilustración 2: Puntuación eventos dinámicos (Fuente: FSG Rules 2024)	18
Ilustración 3: Disposición del trazado del skidpad (Fuente [1])	18
Ilustración 4: BlueStreamline durante el Autocross (Fuente: FSS Media 2024)	21
Ilustración 5: Cuello del tanque de gasolina (Fuente: FSG Rules 2024).....	22
Ilustración 6: Puntuación eventos estáticos (Fuente: FSG Rules 2024)	24
Ilustración 7: Surface envelope (Fuente: FSG Rules 2024).....	25
Ilustración 8: Esquema de la colocación del restrictor (Fuente: FSG Rules 2024)	26
Ilustración 9: Partes de un MCIA (Fuente: MOTORBA®).....	29
Ilustración 10: 4 tiempos del motor (Fuente: Apuntes Motores Térmicos, prof. Fernando Verdú)	30
Ilustración 11: Eficiencia volumétrica vs rpm del motor (Fuente: Apuntes Motores Térmicos, prof. Fernando Verdú)	35
Ilustración 12: Eficiencia volumétrica vs grado de admisión (Fuente: Apuntes Motores Térmicos, prof. Fernando Verdú)	35
Ilustración 13: Diagrama de distribución (Fuente: Elaboración propia)	37
Ilustración 14: Sistema de admisión empleado en FS (Fuente: Elaboración propia)	39
Ilustración 15: Esquema de las partes del sistema de admisión convencional (Fuente: decarreteres.com).....	40
Ilustración 16: Colector de admisión variable (Fuente: El automóvil al desnudo)	40
Ilustración 17: Izquierda: admisión vertical. Derecha: admisión lateral (Fuente: FSS Media 2024).....	41
Ilustración 18: Diferentes tipos de sistemas de admisión con toma vertical (Fuente: Dalhousie University, Sacramento's Hornet Racing Formula Team)	42
Ilustración 19: Toma de aire Ram-air característica de Kawasaki (Fuente: zigwheels.com)	42
Ilustración 20: Ángulo conductos admisión respecto de la vertical (Fuente: Elaboración propia).....	43
Ilustración 22: Resonador de Helmholtz (Fuente: Elaboración propia)	46
Ilustración 21: Cuerpo de válvulas original (Fuente: ebay).....	47
Ilustración 23: Medición del diámetro para los runners (Fuente archivo:).....	51
Ilustración 24: Surface envelope de nuestro monoplaza (Fuente: Elaboración propia)	53
Ilustración 25: Partes de la admision parametrizadas y boceto que parametriza los runners (Fuente: Elaboración propia)	58
Ilustración 26: Flujo de trabajo en Ricardo Wave (Fuente: Elaboración propia)	61
Ilustración 27: Modelo inicial en interfaz de Wavebuild (Fuente: Elaboración propia).....	62
Ilustración 28: Panel general del motor (Fuente: Elaboración propia).....	63
Ilustración 29: Especificaciones motor Honda CBR600 RR (Fuente: [11]).....	64
Ilustración 30: Panel del cilindro (Fuente: Elaboración propia).....	65
Ilustración 31: Modelo del restrictor (Fuente: Elaboración propia)	65
Ilustración 32: Editor de la válvula de mariposa (Fuente: Elaboración propia)	66
Ilustración 33: Uniones en Y (Fuente: Elaboración propia)	67

Ilustración 34: Elemento "Ambient" (Fuente: Elaboración propia).....	68
Ilustración 35: Pestaña "Element" de WaveMesher (Fuente: Elaboración propia)	69
Ilustración 36: Pestañas "Geometry" y "Body" (Fuente: Elaboración propia).....	70
Ilustración 37: Pestaña "Constants" (Fuente: Elaboración propia).....	71
Ilustración 38: Editor del alzado de la válvula (Fuente: Elaboración propia)	72
Ilustración 39: Ventana de control de la simulación (Fuente: Elaboración propia).....	72
Ilustración 40: Modelo del motor en WaveBuild (Fuente: Elaboración propia)	73
Ilustración 41: Ensamblaje sistema admisión y detalle de su fijación (Fuente: Elaboración propia).....	85
Ilustración 42: Planos de control de las secciones del plenum (Fuente: Elaboración propia)	88
Ilustración 43: Solevado superior del plenum (Fuente: Elaboración propia)	88
Ilustración 44: Plenum (Fuente: Elaboración propia).....	89
Ilustración 45: Creación plano boceto runners (Fuente: Elaboración propia).....	89
Ilustración 46: Forma plenum y runners (Fuente: Elaboración propia).....	90
Ilustración 47: Propiedades del plenum (Fuente: Elaboración propia)	90
Ilustración 48: Opción "Crear" para realizar el volumen interior (Fuente: Elaboración propia).....	91
Ilustración 49: Superficies externas eliminadas (Fuente: Elaboración propia)	91



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cálculo longitud de los runners según Helmholtz.....	50
Tabla 2: Características de los materiales de admisión	57
Tabla 3: Parámetros plenum y runners	59
Tabla 4: Potencia y par originales vs nuevo diseño (Fuente de los datos originales: duerote.it)	78



ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Potencia vs velocidad de giro del motor	74
Gráfica 2: Par vs velocidad de giro del motor.....	75
Gráfica 3: Eficiencia volumétrica vs velocidad de giro del motor.....	77
Gráfica 4: Potencia obtenida de la geometría 7	79
Gráfica 5: Par obtenido de la geometría 7.....	79
Gráfica 6: Eficiencia volumétrica obtenida de la geometría 7	80
Gráfica 7: Variación de la potencia con la longitud de los runners.....	81
Gráfica 8: Variación del par con la longitud de los runners.....	81
Gráfica 9: Variación de la eficiencia volumétrica con la longitud de los runners.....	82
Gráfica 10: Variación de la potencia con el volumen del plenum.....	83
Gráfica 11: Variación del par con el volumen del plenum	84
Gráfica 12: Variación da la eficiencia volumétrica con el volumen del plenum.....	84



1. ANTECEDENTES

El sistema de admisión de este proyecto está diseñado para ser integrado en el primer monoplaça del *Illici Racing Team*, el equipo de reciente creación de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH) que participará en la competición Formula Student.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) nace de la necesidad de diseñar y fabricar íntegramente un monoplaça para la competición. Más concretamente, este trabajo surge como uno de los primeros pasos del gran reto que suponen el diseño, la fabricación y el desarrollo del tren de potencia de un vehículo de competición. Dado que parte desde cero, nuestro departamento de *Powertrain* ha sido el encargado de elegir el motor que utilizará el primer monoplaça, así como de diseñar el resto de componentes necesarios para transmitir la potencia a las ruedas. Además del desafío que el diseño supone, la Formula Student establece, mediante su reglamento, una serie de normas que acotan las posibilidades de diseño de los estudiantes. Esto requiere de un notable esfuerzo por parte de los diseñadores para optimizar sus conceptos de una forma que cumplan con lo requerido en la normativa.

1.2 OBJETO

El presente trabajo tiene como objeto el diseño y análisis de un sistema de admisión para un monoplaça de la competición Formula Student. El objetivo principal es conseguir el mejor rendimiento mediante un flujo de aire eficiente, maximizando la potencia y el par a la vez que se cumplen las restricciones técnicas de la competición. Para ello, se realizará una primera aproximación teórica tanto a la competición Formula Student como a los sistemas de admisión para MCI A. Después se generará diferentes geometrías del sistema de admisión mediante software CAD y se simulará cada una de ellas utilizando Ricardo Wave. Finalmente, se discutirá sobre los resultados obtenidos y cómo afecta cada uno de los parámetros elegidos a la potencia, el par y la eficiencia volumétrica del motor.

1.3 ALCANCE

El alcance del presente TFG es el siguiente:

- Análisis de los factores que afectan al sistema de admisión de un motor de combustión interna alternativo de 4 tiempos de encendido provocado.

- Diseño 3D del sistema de admisión mediante el software CAD paramétrico Autodesk Inventor.
- Simulación unidimensional del comportamiento del motor con el nuevo sistema de admisión utilizando el software Ricardo Wave.
- Análisis de los resultados e impresión de las curvas de eficiencia volumétrica, par y potencia.
- Comparativa y análisis del efecto de variar la longitud de los runners de admisión y el volumen del *airbox* en nuestro sistema de admisión.



2 COMPETICIÓN FORMULA STUDENT

2.1 FORMULA STUDENT

La Formula Student es una competición internacional de *motorsport* en la que, de forma anual, estudiantes de universidades de todo el mundo compiten por ver quién es capaz de diseñar, fabricar y finalmente correr con el monoplaza más completo. De esta forma, aporta una incalculable experiencia y conocimiento a aquellos que participan en ella. Todo el trabajo del monoplaza debe ser realizado por los estudiantes del equipo, sin participación directa de ingenieros, pilotos o técnicos externos.

La primera edición, organizada en EE. UU. por la *Society of Automotive Engineers*, tuvo lugar en 1979 y desde entonces se ha convertido en una de las competiciones académicas más grandes y renombradas del mundo. En nuestro país, la Formula Student celebró su primera edición en 2010 en el reconocido circuito de Montmeló, de la mano de la *Sociedad de Técnico de Automoción (STA)* y con la colaboración de importantes compañías del sector automoción.

Hoy en día, existen varias clases de tecnologías para el movimiento de los vehículos; combustión, híbrido, eléctrico o *driverless*. La organización de la competición valora muchos aspectos del rendimiento del vehículo, pero también valora otros aspectos más allá del comportamiento dinámico del vehículo como pueden ser el informe de costes del coche, el plan de negocio asociado al monoplaza de cada equipo o los conceptos de ingeniería utilizados para el diseño del mismo. De esta forma, la FS logra ser una competición multidisciplinar donde tiene cabida desde un perfil de estudiante de Ingeniería hasta uno de Administración de Empresas. Para conseguirlo, se evalúan eventos tanto dinámicos como estáticos.

Además de estas pruebas, que son las que reparten los puntos para la clasificación final de la competición, existen unas inspecciones técnicas previas que son condicionantes para el desarrollo de este TFG. Dado que nuestro monoplaza será de combustión (clase CV – *Combustion Vehicle*), este documento expone únicamente aquellas inspecciones que afectan a esta clase y no se centra en las de los vehículos eléctricos o *driverless*.

2.1.1 INSPECCIONES TÉCNICAS

Son una clase de inspecciones donde los equipos presentan a los *scrutineers* el monoplaza en un estado *ready-to-race*, es decir, listo para correr. Es necesario pasar estas inspecciones para participar en los eventos dinámicos. Todos los puntos por inspeccionar del coche se encuentran en una hoja de inspección que la competición provee a los equipos antes de comenzar la competición. Cuando la inspección resulta favorable se coloca la pegatina correspondiente en la parte delantera del vehículo.

Las inspecciones técnicas que debe pasar un monoplaza con motor de combustión interna son: *Pre-Inspection*, *Mechanical Inspection*, *Tilt Test*, *Brake Test*, *Vehicle Weighing* y *Noise Test*.

- **Pre-Inspection:** el equipo debe presentar los cascos, monos, guantes y demás equipamiento de seguridad que los pilotos vayan a utilizar. Deben cumplir con alguna de las homologaciones recogidas en las reglas de la competición. Además, deben llevar 2 extintores que estén sin usar y actualizados, así como un set de 4 neumáticos sobre las llantas para condiciones de mojado y otro set de 4 para seco.
- **Mechanical Inspection:** debe presentarse el monoplaza, los gatos y la barra para empujar el coche (la normativa obliga a empujar el coche con una barra de color rojo que debe llevar incorporado un extintor). También debe presentarse, entre otras cosas, la documentación necesaria de los atenuadores de impacto, copias de los formularios de equivalencia de las estructuras de seguridad o especímenes del material en el que está fabricado el chasis. Además, debe estar presente el conductor más alto del equipo.
- **Tilt Test:** es una prueba de inclinación donde se coloca el vehículo sobre una mesa de inclinación y se inclina hasta un ángulo de 60°. Se comprueba que ningún fluido fuga y que todas las ruedas mantienen el contacto con la superficie de la mesa de inclinación.



Ilustración 1: Tilt test (Fuente: HofSpannung Motorsport)

- **Brake Test:** consiste en una prueba de frenado donde se comienza desde parado, se acelera en línea recta hasta donde los conos de la prueba marcann y a partir de ahí se debe frenar el vehículo por completo, bloqueando las 4 ruedas y sin calar el motor.
- **Vehicle Weighing:** se pesa el vehículo en condición de *ready-to-race*. Todos los fluidos deben encontrar en su máxima capacidad de llenado.
- **Noise Test:** medición del ruido producido por el motor donde el máximo permitido es de 110 *dB* para la velocidad máxima del motor a la que se prueba y de 103 *dB* para la velocidad de prueba correspondiente al ralenti. La velocidad máxima de motor a la que se prueba es aquella que corresponde con una velocidad lineal del pistón de 15.25 *m/s*. La prueba se realiza con el vehículo levantado sobre gatos y con la caja de cambios en neutral.

Una vez superada la prueba, se comprueba el funcionamiento del interruptor principal, el botón de parada montado en el *cockpit* del coche y el interruptor de inercia. Además, se verifica la estanqueidad del sistema de admisión tapando la entrada de aire al motor y viendo si cala.

2.1.2 EVENTOS DINÁMICOS

Los eventos dinámicos son aquellos en los que se puntúa la velocidad y el rendimiento del monoplaza. A diferencia de otras categorías, la carrera no es una lucha cuerpo a cuerpo, sino que cada piloto sale a correr la prueba con la pista libre para él solo. Aquel equipo que registra el menor tiempo en cada prueba es el que gana. Existen distintos eventos dinámicos que

otorgan la mayor parte de los puntos disputables durante la competición. A continuación, se detalla la puntuación exacta de cada una de las pruebas dinámicas y se explica en qué consiste cada una de ellas:

Dynamic Events:			
Skidpad	50 points		-
Driverless (DV) Skidpad	75 points	75 points	
Acceleration	50 points		-
Driverless (DV) Acceleration	75 points	75 points	
Autocross	100 points		-
Driverless (DV) Autocross		-	100 points
Endurance	250 points		-
Efficiency	75 points		-
Trackdrive		-	200 points

Ilustración 2: Puntuación eventos dinámicos (Fuente: FSG Rules 2024)

- **Skidpad (50 puntos):**

Consiste en un circuito formado por dos pares de círculos concéntricos dispuestos en forma de ocho por el medio de los cuales corre el monoplaza. Por normativa, la distancia entre los centros de los pares de círculos es de 18.25 m. Además, los círculos interiores tienen un diámetro de 15.25 m y los exteriores de 21.25 m, resultando el ancho de la vía en la que se compite en 3 m.

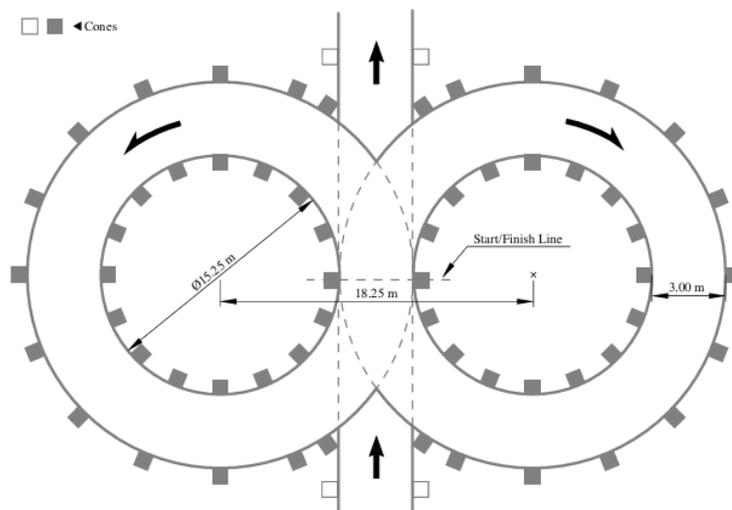


Ilustración 3: Disposición del trazado del skidpad (Fuente [1])

Como se observa en la ilustración 3, el piloto debe entrar en perpendicular al circuito y dar dos vueltas completas a cada uno de los pares de círculos, la primera de ellas

sirve para establecer la vuelta y la segunda de ellas para marcar el tiempo. De esta forma, las vueltas que computan para la puntuación son la nº2, en sentido horario y en el par de círculos de la derecha y la nº4, en sentido antihorario y en el par de círculos de la izquierda. El tiempo del *Skidpad* se calcula como la suma de las penalizaciones más la media de estos dos tiempos. Las penalizaciones vienen, bien de hacer un *Off course* (fuera de ruta, es decir salida del circuito del *Skidpad*) o de derribar y/o desplazar alguno de los conos del circuito. Para obtener la puntuación de la prueba; cada equipo que haya finalizado satisfactoriamente el *Skidpad* obtiene el 5% del máximo de puntos que reparte la prueba (2.5 puntos en este caso). En caso de que el mejor tiempo del equipo se encuentra por debajo de T_{max} , se aplica la siguiente fórmula:

$$Manual_{skidpad_{score}} = 0.95 * P_{max} * \left(\frac{\left(\frac{T_{max}}{T_{team}} \right)^2 - 1}{0.5625} \right)$$

P_{max} es el máximo número de puntos que reparte la prueba.

T_{team} es el mejor tiempo del equipo incluyendo las penalizaciones.

T_{max} es 1.25 veces el tiempo del vehículo más rápido incluyendo las penalizaciones.

- **Acceleration (50 puntos)**: se trata de una prueba de aceleración que se realiza en una recta de 75 metros de longitud. Tiene al menos 3 metros de ancho y está delimitada por conos colocados en intervalos de 5 metros aproximadamente. Los vehículos aceleran desde parado tras la bandera verde que el comisario del inicio de recta les enseña.

Para la puntuación de esta prueba; cada equipo que finaliza una lanzada recibe el 5% del máximo de puntos que reparte la prueba (2.5 puntos en este caso) solo por haber completado con éxito esa lanzada. Si el tiempo del equipo se encuentra por debajo de T_{max} , se reparten más puntos según la fórmula:

$$Manual_{AccelerationScore} = 0.95 * P_{max} * \left(\frac{\left(\frac{T_{max}}{T_{team}} \right) - 1}{0.5625} \right)$$

P_{max} es el máximo número de puntos que reparte la prueba.

T_{team} es el mejor tiempo del equipo incluyendo las penalizaciones.

T_{max} es 1.5 veces el tiempo del vehículo más rápido incluyendo las penalizaciones.

- **Autocross (100 points)**: prueba en la que el vehículo debe dar una vuelta completa al circuito en el menor tiempo posible. Las penalizaciones, de igual forma que en el resto de las pruebas, se producen en caso de salirse del trazado o en caso de mover o derribar alguno de los conos que lo delimitan. Cada equipo tiene hasta 4 intentos, 2 por cada conductor. El trazado debe cumplir las siguientes directrices:
 - Para las rectas: tener una longitud máxima de 80 metros.
 - Para las curvas de radio constante: tener diámetros de hasta 50 m.
 - Para las curvas con forma de horquilla: tener un diámetro exterior mínimo de 9 m.
 - Para las zonas de slalom: tener los conos que la delimitan separados una distancia (en línea recta) de entre 7.5 m y 12 m.
 - Tener una anchura mínima de 3 m.
 - Tener una longitud máxima total de 1.5 km.
 - Incluir elementos variados como chicanes, curvas de más de un vértice, curvas con radio de giro decreciente, etc.

Del mismo modo que en el resto de eventos dinámicos, se otorga el 5% del máximo de puntos que reparte la prueba (5 puntos en este caso) a aquellos equipos que consiguen terminarla con éxito. Si el tiempo del equipo se encuentra, además, por debajo de T_{max} , se otorgan puntos de acuerdo a la fórmula:

$$Autocross_Score = 0.95 * P_{max} * \left(\frac{\left(\frac{T_{max}}{T_{team}} \right) - 1}{0.25} \right)$$

P_{max} es el máximo número de puntos que reparte la prueba.

T_{team} es el mejor tiempo del equipo incluyendo las penalizaciones.

T_{max} es 1.25 veces el tiempo del vehículo más rápido incluyendo las penalizaciones.



Ilustración 4: BlueStreamline durante el Autocross (Fuente: FSS Media 2024)

- **Endurance** (250 puntos): consiste en una carrera que transcurre por un circuito de características muy similares al del Autocross. En este caso sí se puede dar el caso de que haya varios vehículos en pista simultáneamente. Para evitar que los tiempos de los vehículos rápidos se vean lastrados por aquellos que van más lento se designan unas zonas de adelantamiento. Los comisarios del circuito son los encargados de mostrar la bandera azul al coche lento para que se aparte, momentáneamente, al carril lento.

Cada vuelta es de aproximadamente 1 km. El total de la prueba son 22 km, la mitad de los cuales conduce uno de los pilotos, saliendo a mitad de prueba a la zona de cambio de piloto para que complete la segunda mitad el otro piloto. Este cambio se debe realizar con el motor apagado, en un tiempo máximo de

3 minutos. El tiempo extra que el equipo tarde en cambiar de piloto se añade al tiempo final de la prueba.

Antes de empezar, el tanque de gasolina de cada equipo se llena hasta la línea de nivel de combustible. Esta línea deben llevarla, por normativa, todos los equipos en su tanque de combustible y está colocada entre 12 y 25 mm por debajo de la parte más alta de la zona visible del tubo respiradero o *sight tube*.

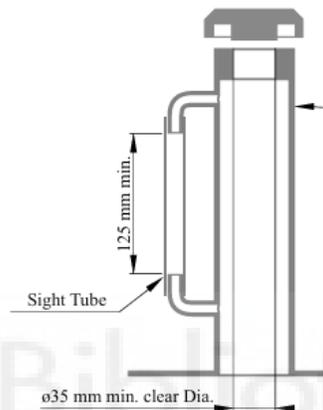


Ilustración 5: Cuello del tanque de gasolina (Fuente: FSG Rules 2024)

El tiempo definitivo de la prueba se determina restando el tiempo de la vuelta larga donde se intercambian los pilotos del tiempo total y añadiendo las sanciones correspondientes. En este caso, además de derribar o desplazar conos y salirse del trazado establecido, hay otras sanciones como puede ser desobedecer las banderas azules. De nuevo, solamente por completar con éxito la prueba se otorga el 10% de los puntos, esto es, 25 puntos. Además, si el tiempo definitivo del equipo está por debajo de T_{max} , se reparten puntos siguiendo esta fórmula:

$$Endurance_Score = 0.9 * P_{max} * \left(\frac{\left(\frac{T_{max}}{T_{team}} \right) - 1}{0.333} \right)$$

P_{max} es el máximo número de puntos que reparte la prueba.

T_{team} es el mejor tiempo del equipo incluyendo las penalizaciones.

T_{max} es 1.333 veces el tiempo definitivo del vehículo más rápido.

En la *Endurance* no solamente se puntúa por ser veloz. Existe de manera conjunta la prueba *Efficiency*. Aquí se valora la eficiencia del coche en términos de consumo. Para optar a puntuar los vehículos deben haber recibido puntos en la *Endurance*, estar por debajo del tiempo máximo establecido arriba y haber consumido menos de 15 kg/100 km (RON 98) o menos de 21.75 kg/100 km (E85). La masa de combustible medida en los coches que utilizan E85 se divide entre 1.45 para compararlos con los de RON 98 (Research Octane Number). La fórmula para repartir los puntos es como sigue:

$$Efficiency_{score} = P_{max} \cdot \left(\frac{EF_{max} - EF_{team}}{EF_{max} - EF_{min}} \right)$$

P_{max} es el total de puntos que reparte la prueba.

EF_{team} es el factor de eficiencia del equipo.

EF_{min} es el factor de eficiencia más bajo de todos los equipos aptos para puntuar en eficiencia.

EF_{max} es 1.5 veces EF_{min} .

Y el factor de eficiencia es:

$$EF = T^2 \cdot E$$

T es el tiempo no corregido de conducción.

E es el consumo de combustible (en masa).

2.1.3 EVENTOS ESTÁTICOS

Aquellos eventos que evalúan más allá del rendimiento del vehículo en pista. Son de igual importancia que los dinámicos porque permiten demostrar el desarrollo integral de su

proyecto. La puntuación de cada una de las pruebas se encuentra en la ilustración 6. Seguidamente, se detalla en qué consiste cada uno.

Static Events:	
Business Plan Presentation	75 points
Cost and Manufacturing	100 points
Engineering Design	150 points

Ilustración 6: Puntuación eventos estáticos (Fuente: FSG Rules 2024)

- **Business Plan Presentation (75 puntos):** cada equipo debe preparar y presentar un plan de negocio que justifique la viabilidad económica del vehículo que han diseñado o de algún componente específico del mismo. Los jueces actúan como potenciales inversores a los que convencer de la oportunidad de negocio que el coche o el componente suponen como producto. La calidad del monoplaza es independiente del Plan de Negocio, esto es, no influye. Debe exponerse un vídeo de lanzamiento de máximo 30 segundos, así como una presentación más larga (de hasta 10 minutos). Antes de la competición, la organización enviará a los equipos un tema específico a tratar en profundidad que debe formar parte de esta presentación larga.
- **Cost and Manufacturing (100 puntos):** aquí se mide la capacidad del equipo de entender los procesos de fabricación y los costes asociados a la construcción de un vehículo prototipo. Esto comprende las soluciones de compromiso entre rendimiento y coste, las decisiones sobre si fabricar o comprar ya fabricado, etc. Previo a la competición se deben enviar 3 Documentos de Reporte de Costes; una Lista de Materiales donde aparece cada parte del vehículo con sus costes y herramientas/procesos de fabricación asociados, un archivo de material de soporte con dibujos y/o fotografías de las partes incluidas en la Lista de Materiales y un archivo de explicación de los costes que ayude a los jueces a entender la justificación de los costes de la Lista de Materiales.
- **Engineering Desing (150 puntos):** evalúa el enfoque técnico, la creatividad, la administración de los recursos de los que se dispone y los procesos de ingeniería que ha seguido el equipo durante el diseño del vehículo. Los

componentes y sistemas comerciales no son evaluados como diseños de los propios estudiantes, pero los motivos de la selección y aplicación de los mismos sí pueden serlo. Se debe entregar un Reporte de Diseño de Ingeniería que contenga una breve descripción general del vehículo e incluya dibujos. También se debe entregar de forma telemática una Hoja de Especificación de Diseño. Estos 2 documentos y la inspección en persona del vehículo permiten a los jueces determinar si los conceptos de diseño son los adecuados y si están bien aplicados.

2.2 NORMATIVA FS

La normativa de la competición, además de establecer un estándar para la seguridad tanto de las personas como de los vehículos participantes, acota las posibilidades de diseño del monoplaza. A continuación, se enumeran las normas que aplican al sistema de aire del motor [1]:

2.2.1 [CV 1.1] LIMITACIÓN DE MOTOR

El motor utilizado para mover el vehículo debe ser un motor alternativo de 4T con una cilindrada inferior a 710 cm^3 .

2.2.2 [CV 1.3] SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE

- [CV 1.3.1]: Todas las partes del sistema deben encontrarse por dentro de la superficie envolvente. La superficie envolvente es todo el espacio que encierran las líneas discontinuas de la ilustración. En la representación de perfil, la línea discontinua va desde el punto más alto del arco de seguridad hasta la estructura más posterior del chasis

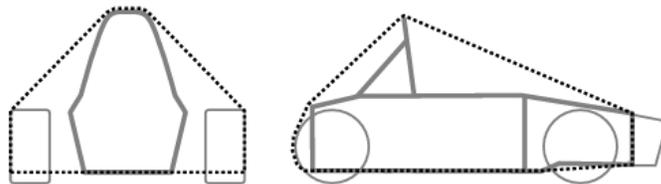


Ilustración 7: Surface envelope (Fuente: FSG Rules 2024)

- [CV 1.3.2]: cualquier parte del sistema de admisión de aire que esté a menos de 350 mm del suelo debe ser protegida frente a impactos. No es el caso de nuestro coche.

- [CV 1.3.3]: el colector de admisión debe fijarse firmemente al bloque motor o a la cabeza de los cilindros por medio de abrazaderas y fijaciones mecánicas. Estas fijaciones son consideradas *critical fasteners* y deben cumplir con el apartado [T10] de la normativa. Este apartado obliga a que todos los *critical fasteners* sean de al menos 4 mm de grado métrico 8.8. Para el caso de tornillería de OEM (fabricante de equipos originales) se permite que sea de 3 mm. Además, todos los *critical fasteners* deben ser pernos de cabeza hexagonal o tornillos de cabeza cilíndrica.
- [CV 1.3.4]: los sistemas de admisión con una considerable masa y/o voladizos desde la cabeza del cilindro deben ser sujetos de forma que eviten tensiones en el sistema de admisión.

2.2.3 [CV 1.4] ACELERADOR

- [CV 1.4.1]: el coche debe estar equipado con un cuerpo del acelerador (cuerpo de la mariposa). Puede ser de cualquier tipo o diseño.
- [CV 1.4.2]: el acelerador debe ser actuado mecánicamente por un pedal en el pie. Se puede controlar también utilizando un cable o un control electrónico del acelerador.
- [CV 1.4.3]: la posición de la mariposa del acelerador se refiere al porcentaje de recorrido desde totalmente cerrado (0%) hasta totalmente abierto (100%). La posición del ralentí es la posición media del cuerpo del acelerador cuando el motor está a ralentí.
- [CV 1.4.4]: el cuerpo de la mariposa debe estar protegido frente a la entrada de suciedad para evitar que se atasque.

2.2.4 [CV 1.7] RESTRICCIÓN DEL SISTEMA DE AIRE O BRIDA DE ADMISIÓN

- [CV 1.7.1]: para limitar la máxima potencia del motor, un limitador de sección circular debe ser colocado de forma que todo flujo de aire de entrada al motor pase a través de él. Para motores atmosféricos el orden debe ser: cuerpo del acelerador, *restrictor* y motor.

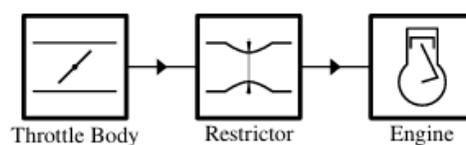


Ilustración 8: Esquema de la colocación del restrictor (Fuente: FSG Rules 2024)

- [CV 1.7.2]: el diámetro máximo de esta brida de admisión para motores de gasolina es de 20 *mm*.
- [CV 1.7.3]: el restrictor debe ser colocado de forma que facilite su medida durante las inspecciones técnicas.
- [CV 1.7.4]: la sección circular no debe ser de ninguna manera móvil ni flexible.



3 LA ADMISIÓN Y SU IMPORTANCIA EN LOS MCIA

La admisión es la primera de las fases que tienen lugar en un motor de combustión interna de cuatro tiempos. Durante el tiempo de admisión, la válvula de admisión está abierta, la de escape cerrada y el pistón realiza una carrera descendente. Esta apertura de la válvula de admisión y el descenso del pistón permiten la aspiración de la mezcla aire-combustible.

En un motor de combustión interna alternativo el sistema de admisión es, por tanto, una parte fundamental del vehículo y juega un papel crucial en el correcto funcionamiento del mismo. Este sistema debe asegurar que un flujo de aire constante sea suministrado a los cilindros del motor para llevar a cabo la combustión de manera correcta. Además, debe encargarse, entre otras cosas que se exponen durante el desarrollo este documento, de que el flujo másico de aire introducido en cada uno de los cilindros sea equitativo.

A continuación, se exponen los conceptos necesarios para poder comprender el funcionamiento del sistema de admisión dentro del conjunto que forma con los motores de combustión interna alternativos.

3.1 CONCEPTO DE MCIA

Un motor de combustión interna alternativo es aquel en el que el movimiento lineal (alternativo) de los pistones dentro del cilindro se transforma, mediante un mecanismo de biela-manivela, en movimiento rotativo que se puede aprovechar por medio del cigüeñal. Para la correcta comprensión de este trabajo, se definen a continuación algunos conceptos y partes del MCIA:

- Cilindro: cámara donde se mueve alternativamente el pistón.
- Pistón: émbolo que interactúa con el fluido dentro del cilindro.
- Biela: conecta pistón y cigüeñal.
- Cigüeñal: convierte el movimiento lineal de los pistones en un movimiento rotativo.
- Válvulas: permiten la entrada de mezcla y la salida de gases de combustión.
- Cámara de combustión: volumen que queda en el cilindro cuando el pistón está situado en el PMS. Aquí se produce la combustión.
- PMS o punto muerto superior: punto más alto del recorrido del pistón.
- PMI o punto muerto inferior: punto más bajo del recorrido del pistón.
- Carrera: distancia entre el PMS y el PMI.

- Relación de compresión: relación entre el volumen total del cilindro y el volumen total de la cámara de combustión.

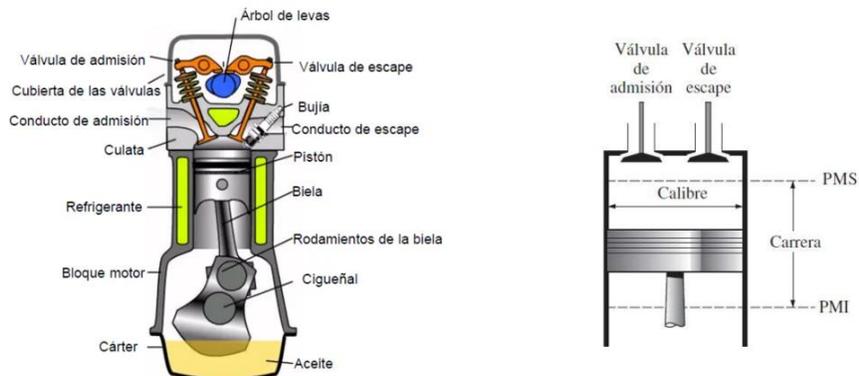


Ilustración 9: Partes de un MCIA (Fuente: MOTORBA®)

3.2 HISTORIA DE LOS MCIA DE 4 TIEMPOS

El primer motor de combustión interna capaz de soportar un uso continuado en el ámbito industrial fue construido por Lenoir (1859). Estaba provisto de un sistema de encendido eléctrico donde una bobina generaba una chispa eléctrica que inflamaba una mezcla de aire y gas previamente introducida al cilindro. El rendimiento era considerablemente más bajo que las máquinas de vapor de la época debido, principalmente, a la falta de carrera de compresión y a la baja relación de expansión utilizada. Pese a todo, se construyeron unos 500 motores de este tipo entre los años 1860 y 1865.

Unos años más tarde, en 1866, Nikolaus August Otto y Eugen Langen desarrollaron en Alemania un motor de combustión interna alternativo de cilindro vertical que fue presentado en la Exposición industrial de París del año siguiente. Para ponerlo en perspectiva, se llegaron a fabricar cerca de 5000 unidades de este motor (10 veces más que del de Lenoir), considerándose como el primer MCIA construido en serie para la industria. Este motor es conocido como el *motor atmosférico de Otto y de Langen* y ya empleaba mezcla aire-gasolina.

Tras unos años de investigación y desarrollo, financiados en gran parte por el éxito en la Expo de París, Otto logró crear el *motor silencioso de Otto* o *motor de ciclo Otto*. El gran cambio que ofreció este motor fue que, a diferencia del de Lenoir, aquí sí existía un tiempo de compresión entre la aspiración de la mezcla y la ignición de la misma. Además, consiguió,

entre otras cosas, confinar la mezcla de combustible en el cilindro para que se quemara de forma progresiva, en oposición a la explosión descontrolada que desgastaba los motores anteriores. En 1876, Otto construyó este motor basado en los principios formulados por Alphonse Beau de Rochas. Para obtener un buen rendimiento Beau de Rochas proponía la utilización de un cilindro único con los siguientes cuatro tiempos:

- **Admisión** de la mezcla de aire.
- **Compresión** de la misma.
- Ignición de dicha mezcla en el punto muerto superior (PMS) del pistón, con la consiguiente explosión y **expansión** de los gases.
- Descarga de los productos de la combustión desde el cilindro (**escape**).

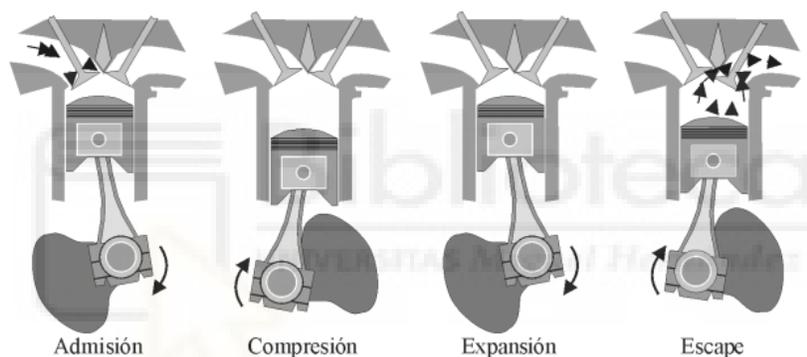


Ilustración 10: 4 tiempos del motor (Fuente: Apuntes Motores Térmicos, prof. Fernando Verdú)

3.3 TIEMPOS DEL MOTOR DE 4T

3.3.1 ADMISIÓN

La admisión es el primero de los tiempos o fases del motor de 4 tiempos. En ella el pistón aspira la mezcla aire-combustible (motores MEP) realizando una carrera descendente en la que las válvulas de admisión se abren y las de escape se mantienen cerradas. Esto significa que el cigüeñal ha girado media vuelta (180°) y el árbol de levas, encargado de la apertura y cierre de las válvulas, ha girado 90° .

3.3.2 COMPRESIÓN

Una vez el cilindro ha llegado al PMI la válvula de admisión se cierra y el ascenso del pistón provoca una compresión de la mezcla confinada en el cilindro. La compresión es posible

dado que la válvula de escape se mantiene cerrada. En este punto, el cigüeñal ha girado 360° y el árbol de levas 180° .

3.3.3 EXPANSIÓN

Justo cuando el pistón esté llegando al PMS se alcanzará la presión máxima. La bujía (motores MEP) emitirá la chispa para provocar la inflamación de la mezcla. La explosión resultante genera una gran cantidad de energía térmica y la expansión de los gases que empujan al pistón de nuevo en su carrera descendente. El cigüeñal habrá girado 180° y el árbol de levas gira 90° , manteniendo ambas levas cerradas. Es en este tiempo donde se produce el trabajo.

3.3.4 ESCAPE

Último de los tiempos del motor. De nuevo realizando una carrera ascendente, el pistón empuja los gases resultantes de la combustión hacia arriba. Estos salen por la válvula de escape que en esta fase sí se encuentra abierta mientras que la de admisión permanece cerrada. Con los gases de escape ya expulsados del cilindro, el ciclo está listo para comenzar nuevamente. Desde el primer tiempo hasta el último se han dado 2 vueltas completas al cigüeñal y 1 vuelta completa del árbol de levas.

Nótese que algunas ideas como el salto de la chispa provocado por las bujías en la fase de explosión ocurren de distinta forma en otros motores de 4t como de encendido por compresión (MEC), donde el combustible se auto inflama por las condiciones de presión y temperatura. Al no ser los MEC objeto de estudio de este trabajo no se hace referencia a esta ni al resto de diferencias existentes entre un tipo y otro.

3.4 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

3.4.1 POTENCIA

Es una medida de la capacidad del motor de realizar trabajo en un determinado periodo de tiempo. Este tipo de motores transforma la energía química del combustible en energía mecánica mediante la combustión en el interior de los cilindros, generando un movimiento alternativo que luego se convierte en movimiento de rotación en el cigüeñal. La potencia indicada, que representa la potencia total generada dentro de los cilindros, viene dada como:

$$N_i = \frac{W}{t}$$

Donde:

N_i [W] es la potencia indicada.

W [J] es el trabajo.

t [s] es el tiempo.

Existen otros tipos de potencia en los MCIA, dependiendo de dónde se realice la medición:

- Potencia efectiva → es la potencia que se tiene en el eje del cigüeñal. De menor valor que la indicada puesto que existen pérdidas hasta la salida de fuerza por el cigüeñal.
- Potencia neta → es la potencia que tiene en cuenta las pérdidas en auxiliares y accesorios del motor (bombas de aceite o agua, alternador...).
- Potencia a las ruedas → la que de forma efectiva llega a las ruedas del coche. Esta es la expresada en los resultados de este trabajo. Descontando toda aquella pérdida que se produce entre medias. Esta última puede expresarse como:

$$N_{ruedas} = m_{faire} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \left(\frac{A}{F}\right)_{esteq}} \cdot PCI \cdot \eta_{comb} \cdot \eta_{term} \cdot \eta_{renov} \cdot \eta_{mec}$$

Donde:

m_{faire} es el flujo másico de aire entrante [kg/s].

λ es el coeficiente de exceso de aire [-].

$\left(\frac{A}{F}\right)_{esteq}$ es la relación aire-combustible estequiométrica [kg_a/kg_c].

PCI es el poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg].

η_{comb} es la eficiencia en la conversión de energía química en calor [-].

η_{term} es la eficiencia en la conversión de ese calor en trabajo [-].

η_{renov} es la eficiencia en el proceso de renovación de la carga [-].

η_{mec} es el rendimiento mecánico (fricción, auxiliares, bombeo...) [-].

3.4.2 PAR

En física, el par (o torque) es la fuerza que actúa sobre un cuerpo aplicada en forma de palanca. Es la magnitud física que resulta de multiplicar la fuerza que se aplica sobre un cuerpo por la distancia entre el cuerpo y el apoyo donde se está realizando esa fuerza. En un motor de combustión esto se traduce como la fuerza de torsión que un motor puede generar para hacer girar el eje del cigüeñal. Se mide en Newton-metro (Nm). La fórmula del par efectivo viene dada por:

$$T_e = \frac{N_e}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

Donde:

N_e es la potencia efectiva [W].

n es la velocidad de giro del motor [rad/s].

3.4.3 RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO

La capacidad de aire (real) se define como el flujo másico de aire fresco a través del motor por unidad de tiempo. Mientras que la capacidad de aire ideal es la que se corresponde con el llenado del volumen desplazado por el cilindro con mezcla fresca en las condiciones de admisión. Es un parámetro muy importante porque de él depende directamente el comportamiento del motor y además nos ayuda a comprender el concepto de rendimiento volumétrico.

El rendimiento volumétrico de un motor se define como la relación entre la capacidad real de aire y la capacidad ideal de aire. Esto es igual a la relación entre el flujo de aire que entra al cilindro en el tiempo de admisión y el flujo de aire equivalente al desplazamiento del pistón en condiciones de temperatura y presión iguales a las de referencia (suelen tomarse las de admisión). La fórmula del rendimiento volumétrico es:

$$\eta_{vol} = \frac{m_{real}}{m_{ideal}} = \frac{m_{real}}{V_D \cdot \rho_{ref}}$$

Donde:

m_{real} es la capacidad de aire real [kg/s].

V_D es el volumen desplazado por el cilindro [m³].

ρ_{ref} es la densidad del aire en las condiciones de referencia [kg/m³].

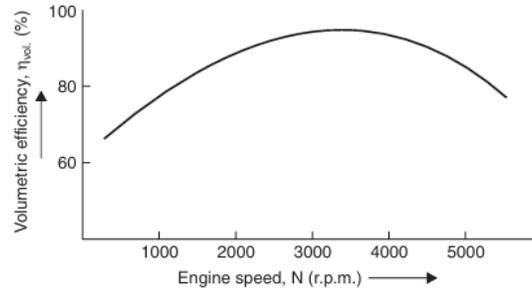
m_{ideal} es la capacidad de aire ideal [kg/s].

Se intuye que cuanto mayor sea el rendimiento volumétrico, mayor será el aire suministrado de forma efectiva al motor y, de esta forma, mayor será la potencia que pueda desarrollar.

Los efectos de algunos factores sobre el rendimiento volumétrico se exponen a continuación:

- **Combustible:** en motores carburados de inyección, el combustible es añadido al aire y el volumen de combustible vaporizado desplaza parte del aire entrante. En el caso de los antiguos motores carburados, su valor siempre era menor que la unidad. Hoy en día, con el desarrollo de sistemas de admisión más avanzados y la sobrealimentación, se supera la unidad. En orden decreciente de pérdidas en el rendimiento volumétrico según la forma de mezclar el combustible con el aire encontramos; motores carburados, inyección indirecta e inyección directa.
- **Transferencia de calor:** el sistema de admisión se encuentra a mayor temperatura que el aire que lo rodea y, lógicamente, el aire entrante se calentará en contacto con las paredes del mismo. Este calentamiento hace que la densidad del aire baje, reduciendo la eficiencia volumétrica. No es un factor extremadamente crítico, pero sí a tener en cuenta, especialmente para la elección de los materiales del múltiple de admisión.
- **Cruce de válvulas:** por un lado, el cruce de válvulas puede mejorar el llenado y conseguir que el rendimiento volumétrico sea mayor. Por otro lado, cerca del PMS al final de la fase de escape y el inicio de la admisión, tanto la/s válvula/s de admisión y escape se encuentran abiertas al mismo tiempo, lo que puede llevar a que algunos gases de escape salgan por la válvula de admisión y desplacen parte del aire fresco que debiera entrar al cilindro, disminuyendo el rendimiento. He aquí una de las razones por las que se debe estudiar minuciosamente el cruce de válvulas.

- Velocidad de giro del cigüeñal: al aumentar el número de revoluciones se mejora la distribución y aumenta el rendimiento. Cuando llega a cierto número de revoluciones el η_{vol} disminuye de nuevo debido a la pérdida de carga.



*Ilustración 11: Eficiencia volumétrica vs rpm del motor
(Fuente: Apuntes Motores Térmicos, prof. Fernando Verdú)*

- Grado de admisión: denota la estrangulación que se está ejerciendo sobre la corriente entrante mediante la mariposa del acelerador. En la siguiente gráfica observamos cómo la situación de plena carga (apertura máxima del acelerador) es la que maximiza la eficiencia volumétrica ya que el motor está aprovechando al máximo su capacidad para admitir aire en los cilindros.

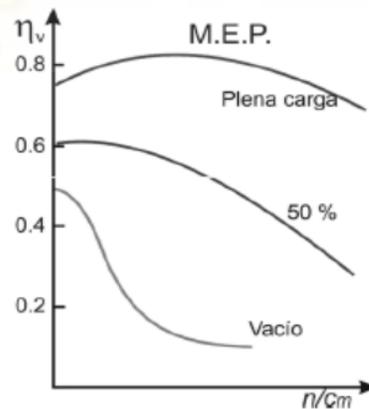


Ilustración 12: Eficiencia volumétrica vs grado de admisión (Fuente: Apuntes Motores Térmicos, prof. Fernando Verdú)

3.5 RENOVACIÓN DE LA CARGA

Es el proceso por el cual se evacúan los gases quemados del ciclo anterior y se reemplazan con una nueva mezcla de aire y combustible. Es de vital importancia, pues influye sobre prestaciones del motor como la potencia, el rendimiento efectivo del motor y las emisiones sonoras provenientes de ruidos en la admisión y el escape, entre otras.

En el ciclo ideal, el proceso de escape se realiza tras la carrera de expansión y la válvula se abre instantáneamente cuando el pistón está en el PMI. A partir de aquí el pistón empuja a los gases resultantes de la combustión hacia el conducto de escape mediante una descarga ideal y a la presión existente en el escape, hasta que llega al PMS. Una vez en el PMS, el ciclo ideal considera que tanto la apertura de la válvula de admisión como el cierre de la de escape se realizan también de forma instantánea.

Del mismo modo que sabemos que esa hipótesis no se cumple en condiciones reales (la apertura y cierre de válvulas requieren de un mínimo de tiempo), el ciclo ideal de renovación de carga considera algunas hipótesis que se desvían de la realidad como, por ejemplo:

- Considera la velocidad del pistón lo suficientemente lenta como para que no aparezcan fenómenos de inercia en los movimientos de los gases.
- Considera el proceso de renovación de la carga un proceso adiabático, esto es, donde no hay transferencia de calor entre el fluido y las paredes que lo rodean. En la realidad ni el proceso de admisión, ni el de expansión, ni el de ignición dentro de la cámara de combustión son estrictamente adiabáticos.
- No considera las pérdidas de carga en el proceso de admisión debidas a la fricción fluido-pared ni a la turbulencia del flujo.

Volviendo sobre la idea de la apertura y cierre de las válvulas, es bien sabido que es físicamente imposible que se produzca de forma instantánea. Debido a la naturaleza dinámica de los flujos de gases, el aire y los gases de escape no responden de manera inmediata al abrir o cerrar las válvulas. Para mejorar la renovación de la carga y por ende la eficiencia del motor, se recurre al adelanto y el atraso de la apertura y el cierre de las mismas. Los instantes de apertura y cierre de las válvulas se definen en el diagrama de distribución.

3.5.1 DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN

Los objetivos de la optimización del diagrama de distribución son mejorar el llenado y disminuir el trabajo de bombeo, es decir, aumentar la cantidad de mezcla introducida al cilindro y aumentar la velocidad con la que se vacían los gases de combustión del cilindro.

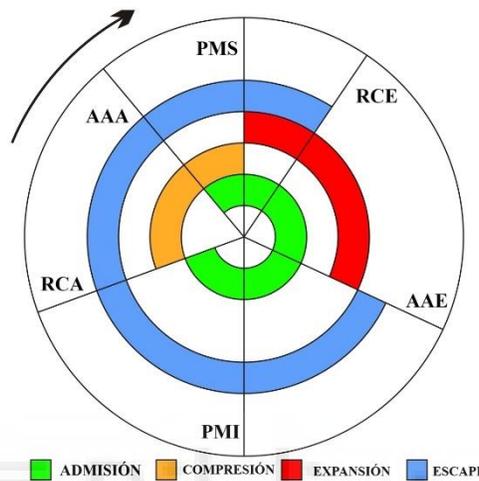


Ilustración 13: Diagrama de distribución (Fuente: Elaboración propia)

Avance de la apertura de escape (AAE): cuanto antes se abra la válvula de escape o, lo que es lo mismo, cuanto mayor sea el ángulo de AAE, menor será el trabajo de bombeo. Esto es así dado que se consigue bajar la presión dentro del cilindro antes de empezar la carrera de escape. Permite que los gases de escape sean vaciados más rápidamente. El AAE óptimo aumenta a medida que aumenta el régimen de giro puesto que el tiempo disponible para que los gases salgan es menor cuando aumenta la velocidad lineal del pistón. Variar el AAE no modifica otros ángulos.

No obstante, adelantar demasiado el AAE puede llevar a pérdidas en el trabajo de expansión. El AAE óptimo es un compromiso entre el menor trabajo de bombeo y el mayor trabajo de expansión.

Retraso del cierre de admisión (RCA): utilizado para maximizar el llenado del cilindro y mejorar la eficiencia volumétrica, especialmente a altas revoluciones. Un RCA elevado puede conducir a un fenómeno conocido como reversión de la mezcla cuando los regímenes son bajos. Esto último sucede cuando el pistón comienza a comprimir la mezcla antes de que la

válvula de admisión se haya cerrado por completo y provoca que parte de la mezcla fresca vuelva al colector de admisión. Cuando las revoluciones aumentan, el tiempo de llenado del cilindro disminuye. El breve periodo adicional que la válvula de admisión queda abierta permite maximizar el aire que entra al cilindro. Además, aprovecha que la inercia del aire lo hace seguir fluyendo hacia el cilindro incluso después de que el pistón comience la carrera de compresión.

Avance apertura admisión (AAA): Para evitar una pequeña depresión dentro del cilindro al comienzo del proceso de admisión se adelanta un poco la apertura de la válvula de admisión. De esta manera, y en coordinación con el RCE, se aprovecha también la inercia de la evacuación de los gases quemados para succionar en la admisión. Igual que el RCA, consigue que la mezcla pueda ingresar durante más tiempo.

Retraso del cierre de escape (RCE): provoca un efecto de barrido de los gases residuales que consiguen crear una pequeña succión en la mezcla. También garantiza que queden menos gases residuales dentro del cilindro para que cuando vuelva a producirse el tiempo de admisión la mezcla sea lo más fresca posible.

El RCA y el AAE son los que más influyen sobre el rendimiento volumétrico.

El solapamiento que se produce cuando tanto la válvula de admisión como la válvula de escape están abiertas simultáneamente se conoce como cruce de válvulas. Para calcular el cruce de válvulas se suman los grados del AAA y los grados del RCE. El cruce de válvulas sucede en posiciones cercanas al PMS.

3.6 EL SISTEMA DE ADMISIÓN EN LA FS

En este apartado se describen las principales consideraciones de diseño a tener en cuenta a la hora de diseñar el sistema de admisión para la FS. El sistema de admisión es un sistema de vital importancia del tren de potencia encargado de introducir aire limpio en los cilindros para que se mezcle con el combustible y permita la combustión. Un buen sistema de admisión es aquel capaz de; repartir el flujo másico de aire de forma equitativa a todos los cilindros, aumentar la velocidad del aire hacia el cilindro, minimizar al máximo las pérdidas de presión y conseguir que la distribución de presiones estáticas sea igual (y lo más altas posibles) en todo el plenum para que el flujo sea lo más uniforme posible.

Generalmente, un sistema de admisión de FS está formado por diferentes componentes que, siguiendo el orden en que el aire los recorre, son:

1. Filtro de aire: asegura la llegada de aire limpio al filtro. Retiene tanto partículas pequeñas como grava u otros elementos que puedan intentar colarse al sistema. Suelen estar hechos de materiales porosos o fibrosos como papel plisado. En nuestro caso, siguiendo lo observado en la competición, se utilizará una malla fina de algún material metálico como filtro de aire.
2. Cuerpo del acelerador: válvula de mariposa gobernada mecánica o eléctricamente que regula la cantidad de aire que entra al sistema. El cuerpo del acelerador puede ser de cualquier tipo.
3. *Restrictor*: elemento que incluye la normativa de la *Formula Student* para limitar la potencia de los motores. Se trata simplemente de una sección circular que, para motores atmosféricos, según las reglas de la competición, debe estar ubicado entre el cuerpo del acelerador y el motor. Se utiliza también en otras categorías de automovilismo como GT's o rallyes. También se conoce como brida de admisión.
4. Plenum de admisión: cámara en el sistema de admisión donde se encuentra el mayor volumen de aire y se encarga de distribuirlo de manera uniforme a todos los cilindros. Debe garantizar que la presión en el colector de admisión sea mayor que en los cilindros. Unido en su “entrada” al restrictor y en su “salida” a los *runners*. Su volumen se diseña para ser entre 1.5 y 3 veces la cilindrada del motor [2].
5. *Runners*: conductos o tubos individuales que conectan el plenum con la culata.

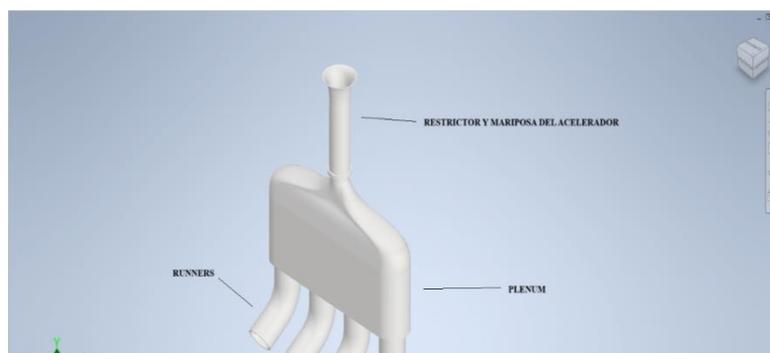


Ilustración 14: Sistema de admisión empleado en FS (Fuente: Elaboración propia)

Estos 5 elementos son los que encontramos en nuestro sistema de admisión, pero no en todos los vehículos están presentes ni tienen la misma forma. En el caso de, por ejemplo, un automóvil de calle, los elementos pueden cambiar. No encontramos ningún restrictor. A su vez, el volumen del plenum no necesariamente debe encontrarse en el rango especificado.

Actualmente existen sistemas de admisión capaces de variar el diámetro y/o la longitud de los runners en función del régimen de giro del motor para adecuarse mejor al funcionamiento del mismo. Generalmente lo hacen utilizando válvulas de mariposa que se abren a medida que las revoluciones del motor aumentan, dejando pasar más aire. Son los conocidos como sistemas de admisión variable. Para la realización de este TFG se ha optado por un sistema convencional debido a la complejidad técnica añadida que supone el sistema de admisión variable. No solo es más difícil de diseñar, programar y analizar sino también más costoso económicamente y demandante a nivel de recursos.

Generalmente, runners largos favorecen la potencia y el par cuando el motor gira a bajas revoluciones, pero cuando el régimen aumenta es necesario un flujo de aire más rápido, siendo preferible utilizar un runner más corto.

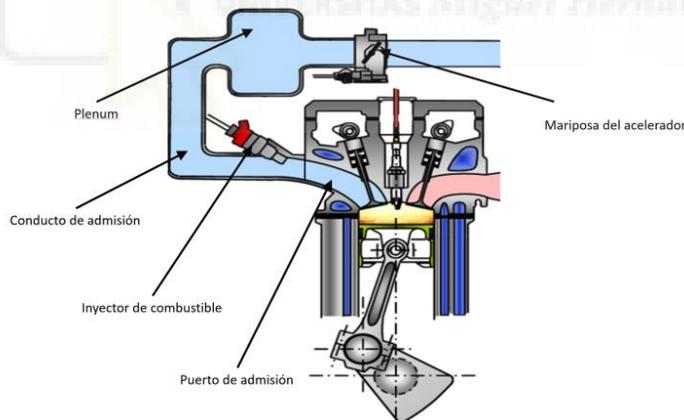


Ilustración 15: Esquema de las partes del sistema de admisión convencional (Fuente: decarreteres.com)

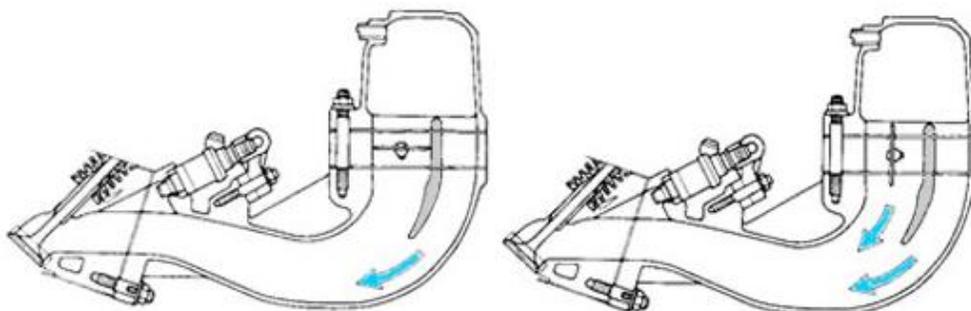


Ilustración 16: Colector de admisión variable (Fuente: El automóvil al desnudo)

3.6.1 PLENUM

Uno de los factores determinantes de la forma del plenum de admisión es la orientación de la “trompeta” o restrictor por donde entra el aire. Los tipos de colocación de esta toma de aire son principalmente tres; superior, lateral y trasera (esta última apenas utilizada por ningún equipo).



Ilustración 17: Izquierda: admisión vertical. Derecha: admisión lateral (Fuente: FSS Media 2024)

Normalmente se dispone esta “trompeta” de forma que se eviten zonas de baja presión generadas por los apéndices aerodinámicos del coche. Este primer monoplaza del IRT no cuenta con alerón delantero, trasero, ni fondo plano, luego no encontramos ningún componente aerodinámico que suponga un problema en este aspecto.

Sí debe evitarse orientar la entrada de aire hacia zonas donde pueda haber calor retenido o que sean propensas a calentarse, como los colectores de escape o la zona de alta temperatura del radiador.

Para este diseño, teniendo en cuenta lo mencionado en los párrafos anteriores, se ha optado por una admisión superior dado que no resta efecto aerodinámico en el alerón trasero (al no existir el mismo) y garantiza aire fresco. Revisando las admisiones de otros equipos participantes en FS, existen muy diversos tipos de sistemas de admisión con la toma situada en la parte superior del monoplaza. Tras lo observado en Formula Student Spain 2024 a otros equipos que o bien llevan poco tiempo compitiendo o bien disponen de recursos limitados para construir el monoplaza, la mayoría incorporaba geometrías similares a la de la izquierda en la ilustración 18. Al existir tantas referencias previas que aseguran un buen comportamiento y ser la línea de diseño que todos los equipos principiantes/humildes parecen

seguir, se ha optado por realizar un diseño que sea, en forma, parecido a aquellos que equipan otros equipos de FS.



Ilustración 18: Diferentes tipos de sistemas de admisión con toma vertical (Fuente: Dalhousie University, Sacramento's Hornet Racing Formula Team)

Otro de los factores relevantes para el diseño del plenum, y muy relacionado con la orientación del mismo, es el conseguir que la presión estática dentro del plenum sea lo más alta posible. Y es que, en un primer acercamiento al diseño del tramo de admisión, uno puede pensar que la toma de aire puede colocarse orientada hacia la parte trasera del monoplace (tipo *snorkel* que equipan algunos 4x4) ya que de esta forma se suministra aire suficiente al motor y actúa en cierto modo como un filtro de aire (evita la entrada de partículas peligrosas, restos de gravilla...).

Sin embargo, desde los años 60, algunos fabricantes de coches empezaron a utilizar el aire de alta presión dinámica que encuentra el frontal del coche como un aliado para aumentar la presión estática del aire de admisión y no solo como una resistencia aerodinámica que vencer. No obstante, se abandonó el concepto hasta la llegada de la inyección porque este sistema, a pesar de aumentar la eficiencia volumétrica, era perjudicial para el efecto Venturi necesario



Ilustración 19: Toma de aire Ram-air característica de Kawasaki (Fuente: zigwheels.com)

para los carburadores de la época. Una vez la inyección electrónica se convirtió en un estándar en la industria automotriz (incluidas las 2 ruedas), se recuperó este sistema, con algunos fabricantes de motos apostando fuertemente por él. La clave de este sistema, y lo que se ha buscado en el diseño de esta admisión es que, a pesar de la estrangulación de 20 mm donde el aire se acelera y pierde presión, la máxima cantidad de la presión dinámica proveniente del movimiento relativo de la toma de admisión en un fluido (el aire que encuentra el coche), se convierta en presión estática dentro del *airbox* de admisión. Esto mejora en el rendimiento del motor dado que está entrando más oxígeno al cilindro.

De esta manera, se consigue a altas velocidades un efecto similar (aunque ni mucho menos tan exagerado) al de los motores sobrealimentados, consiguiendo que la presión de admisión sea mayor que la atmosférica a velocidades altas. La presión dinámica se da como:

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2$$

Donde: ρ es la densidad del fluido (aire en este caso), y u es la velocidad del fluido.

Nótese que la densidad del aire no va a cambiar por los regímenes de velocidad en los que nos movemos y por tanto es la velocidad, que está elevada al cuadrado, la que generará ese ligero aumento de presión. Que la velocidad aumente de forma cuadrática quiere decir que, duplicándola, la presión dinámica se cuadruplica. Este aumento es del orden de milibares pero es importante tenerlo en cuenta para nuestro diseño.

Para evitar pérdidas de carga, el tramo del restrictor y el plenum no tienen inclinación entre ellos. Al estar el inicio de los conductos de admisión colocado con un ángulo de 20° respecto

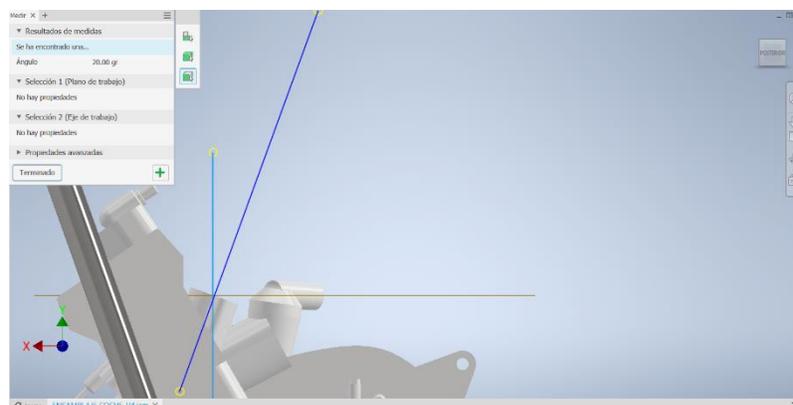


Ilustración 20: Ángulo conductos admisión respecto de la vertical (Fuente: Elaboración propia)

de la vertical (ver ilustración 22), el giro para canalizar el aire desde el plenum a los conductos de admisión del motor lo aportan los runners.

Como se ha comentado previamente, debe conseguirse la ralentización del flujo en el plenum de admisión. Esto se consigue aumentando la sección para que la expansión del aire se traduzca en un aumento de la presión estática. Aunque el objetivo sea que con el cambio de sección el aire gane presión estática dentro del *airbox*, debe tenerse en cuenta que no deben existir cambios de sección exageradamente bruscos. Estos cambios llevan a la separación del fluido de las paredes, generando zonas bien de estancamiento o de recirculación, que dan lugar a que la energía cinética del flujo se disipe en forma de turbulencia en lugar de convertirse en presión estática.

A continuación, algunos de los sistemas de admisión que se han utilizado como referencia para el diseño:

3.6.2 RUNNERS

Como describe D. Walker en *Intake Trumpets: The Theory* [3], para entender el llenado del cilindro se puede pensar en una botella de vino. Al intentar abrirla sacando el corcho, un vacío parcial se forma debajo de él y cuando el corcho está fuera completamente de la botella se escucha un “pop” provocado por el aire exterior, que rellena rápidamente ese vacío. De esta forma, cuando la válvula de admisión se abre, se genera esa onda de expansión que está moviendo aire hacia dentro de los cilindros. Cuando vuelve a cerrarse, esta onda se refleja en el sentido contrario y vuelve por el runner hacia el plenum.

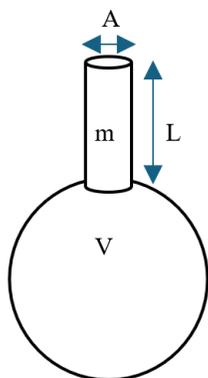
La correcta sincronización de estas ondas para que las ondas de expansión entren al cilindro antes de que la válvula se cierre se utiliza como principio de diseño de colectores de admisión para introducir un poco más de mezcla en el cilindro. El correcto dimensionamiento de los runners es imprescindible para el funcionamiento del motor, si el runner es demasiado corto, la onda reflejada (o de compresión) podría abandonar el runner antes de que la válvula se vuelva a abrir para succionarla. A su vez, si el runner es demasiado largo, el aire circulando por su interior sufrirá más las inercias, reaccionando demasiado lento cuando el motor gira a altas revoluciones y reaccionando más lento a los cambios de presión en el plenum (por ejemplo, cuando se abre el acelerador). Generalmente, pueden utilizarse runners largos y de

diámetro pequeño para mejorar el rendimiento del motor a bajas velocidades, mientras que para velocidades altas se sugiere el uso de runners cortos y un diámetro mayor [4].

En este trabajo, el diámetro se mantiene constante e igual a 36.5 mm y se varían las distintas longitudes de los runners, así como con el volumen del plenum. De forma similar a lo que ocurre con los runners, un plenum más grande es beneficioso para el rendimiento del motor a bajas revoluciones, pero va en detrimento del rendimiento cuando las revoluciones aumentan. Además, aumentar el volumen del plenum supone más peso, a una altura más elevada, lo que va afecta negativamente el comportamiento dinámico del monoplaza. Teniendo todo esto en cuenta, se debe encontrar un equilibrio en el diseño que permita que el motor no se comporte de forma “perezosa” cuando gira a bajas vueltas pero que tampoco entregue toda la potencia en estos regímenes y desfallezca al aumentar la velocidad de giro.

3.6.3 RESONADOR DE HELMHOLTZ

Al iniciarse el tiempo de admisión, el descenso de la válvula de admisión crea unas ondas de depresión alrededor de la misma. Esta onda se va propagando a lo largo de los *runners* de admisión y el aire es acelerado hacia dentro del cilindro a la vez que el pistón sigue incrementando su velocidad. Una vez llega al PMI y la velocidad del cilindro vuelve a ser nula (antes de comenzar su ascenso de nuevo), el fluido continúa entrando y convierte su energía cinética en energía de presión. Al mismo tiempo, la onda de depresión original se convierte en una onda de compresión cuando la válvula está cerrando de nuevo. Un resonador de Helmholtz consiste en una cavidad de volumen V , con un cuello de sección S y longitud L . Cuando la longitud de onda supera alguno de los valores $\sqrt[3]{V}$, $\sqrt[2]{S}$ o L , el aire del cuello se empieza a comportar como un bloque con una determinada masa m . El aire que está contenido en la cavidad actúa como un muelle con una determinada constante elástica k .



*Ilustración 21: Resonador de Helmholtz
(Fuente: Elaboración propia)*

En el caso de un MCI, el resonador de Helmholtz describe la interacción entre el volumen de aire en el cilindro (la cavidad) y la masa de aire que oscila en el runner (conducto). Pese a que el volumen del cilindro siempre varía durante el tiempo que la válvula de admisión permanece abierta, se simplifica asumiendo el volumen total disponible en el cilindro.



4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE LA ADMISIÓN PARA FS

4.1 NECESIDAD DE CAMBIO DEL DISEÑO DE LA ADMISIÓN ORIGINAL

Inicialmente es lógico pensar que lo óptimo para conseguir el mejor rendimiento del motor de la Honda CBR600 RR es reutilizar el airbox original de la misma. Sin embargo, esto es inviable por las diferentes características geométricas que tienen una moto y un monoplaza y por ciertos detalles que aparecen en la adaptación del motor de moto a un fórmula sujeto a la normativa de la FS:

- El cuerpo de válvulas de mariposa original no cumple con la normativa de la FS. En concreto, no cumple con el apartado CV [1.7.1] donde se establece que la/s mariposa/s del acelerador deben situarse antes del restrictor. Un esquema con más detalles acerca de cómo deben ir colocadas la mariposa del acelerador, el restrictor y el motor ha sido expuesto en el apartado 2.2.4.



Ilustración 22: Cuerpo de válvulas original (Fuente: ebay)

- En una moto el flujo de aire que llega al *airbox* lo hace de forma directa, encontrando en su camino pocos o ningún elemento (horquilla, guardabarros delantero...) mientras que, en un monoplaza, al ir el motor en posición trasera o central-trasera, el flujo de aire directo al *airbox* queda impedido por la presencia del propio piloto y el *firewall* del coche. De aquí la necesidad de utilizar sistemas de admisión diferentes al original que recojan el aire en algún punto capaz de suministrar el suficiente aire en condiciones óptimas.
- La geometría original es demasiado compleja como para hacerla funcionar correctamente estando en la parte trasera del vehículo. La original se encuentra dividida en 2 secciones de entrada del aire que en una moto son óptimas, pero en un

coche actúan en detrimento del rendimiento del motor. La implementación de los distintos restrictores que requeriría cada válvula individual del acelerador haría imposible adaptar el airbox original a la normativa de la FS.

4.2 LONGITUD DE HELMHOLTZ

Aplicando la teoría del resonador de Helmholtz al sistema de admisión, se puede considerar que los runners, que se encuentran llenos de aire, verán incrementada su presión y actuarán como un muelle empujando aire hacia el cilindro de nuevo. La ecuación del resonador de Helmholtz se utiliza para diseñar los runners de forma que se aprovechen las ondas de presión que se propagan por el sistema de admisión como resultado del cierre de la válvula de admisión:

$$f = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A}{V * L}}$$

Donde:

f es la frecuencia de resonancia, aquella donde se quiere maximizar el rendimiento del motor (Hz).

c es la velocidad del sonido, apróx. 343 m/s en el aire a 20°C (m/s).

A es el área transversal del cuello del resonador (m^2).

V es el volumen de la cavidad, en este caso el volumen efectivo del motor (m^3).

L es la longitud efectiva del cuello del resonador, en este caso la longitud de los runners (m).

El volumen efectivo hace referencia al volumen del cilindro cuando el pistón se encuentra en su punto de mayor velocidad, esto es, en la mitad de la carrera. Y se puede calcular con la siguiente ecuación, que lo relaciona con el volumen de barrido del pistón (V_D) y con el volumen de la cámara de combustión (V_{CC}). Todo ello en m^3 .

$$V = \frac{V_D}{2} + V_{CC}$$

Podemos expresar la misma ecuación en función de la relación de compresión y del volumen de barrido del pistón. Dado que la RC es el ratio entre el volumen del cilindro más el de la cámara de combustión y el volumen de la cámara de combustión:

$$RC = \frac{V_D + V_{CC}}{V_{CC}}$$

Reescribiendo la ecuación del volumen efectivo y racionalizando la expresión:

$$\begin{aligned} V &= \frac{V_D}{2} + \frac{V_D}{RC - 1} = \frac{V_D \cdot (RC - 1)}{2 \cdot (RC - 1)} + \frac{2 \cdot V_D}{2 \cdot (RC - 1)} = \frac{V_D \cdot (RC - 1) + 2 \cdot V_D}{2 \cdot (RC - 1)} = \\ &= \frac{V_D \cdot (RC - 1 + 2)}{2 \cdot (RC - 1)} = \frac{V_D \cdot (RC + 1)}{2 \cdot (RC - 1)} \end{aligned}$$

Sustituyendo lo anterior y adaptándolo a un motor de combustión interna [5], podemos llegar a:

$$\begin{aligned} f &= \frac{162}{K} \cdot c \cdot \sqrt{\frac{A \cdot (RC - 1)}{L \cdot V_D \cdot (RC + 1)}} \\ L &= \frac{A \cdot (RC - 1)}{V_D \cdot (RC + 1)} \cdot \left(\frac{162 \cdot c}{f \cdot K} \right)^2 \end{aligned}$$

Donde:

A es la sección del cuello del resonador, en este caso de los runners.

RC es la relación de compresión.

c es la velocidad del sonido, apróx. 343 m/s en el aire a 20°C.

V_D es el volumen de barrido del pistón.

f es la frecuencia de resonancia, aquella velocidad de giro del cigüeñal donde se quiere maximizar el rendimiento del motor.

K es una constante que toma valores entre 2 y 2.5.

A continuación, la tabla 1 expresa los valores de cada uno de los parámetros tanto en unidades del SI como en el sistema de unidades imperiales, que son las utilizadas para el cálculo en la expresión final de la ecuación del resonador:

Tabla 1: Cálculo longitud de los runners según Helmholtz

Cálculo longitud runners				
Parámetro	Valor SI	Unidad SI	Valor unidades imperiales	Unidad sistema imperial
Área cuello resonador	$1,0463 \cdot 10^{-3}$	m^2	1,437	$inch^2$
Relación de compresión	12:1	-	12:1	-
Velocidad del sonido	343	m/s	1125	ft/s
Volumen de barrido del pistón	$1,4975 \cdot 10^{-4}$	m^3	9,1364	$inch^3$
Velocidad de giro del motor	8400	rpm (no SI)	8400	rpm (no sistema imperial)
Constante K	2,5	-	2,5	-

El área del cuello del resonador se ha calculado con el diámetro de entrada de la culata del motor de la Honda CBR600 RR ya que un diámetro mayor supondría pérdidas de carga en la zona donde conectan culata y runner así como un incremento en el coste de fabricación (más material). Como podemos observar en la siguiente imagen, el valor del diámetro de entrada es de $36,5 \text{ mm}$. La medición se ha realizado en Inventor sobre un modelo CAD extraído de la página web GrabCAD [6].

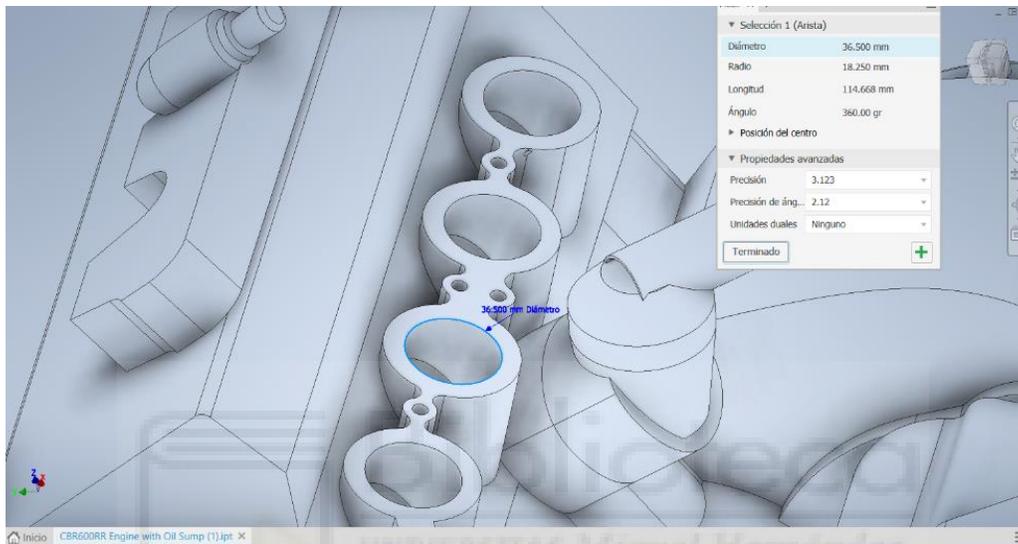


Ilustración 23: Medición del diámetro para los runners (Fuente archivo:)

La relación de compresión viene en el manual de taller de la Honda CBR600 RR y es de 12:1, el volumen de barrido del pistón es $599/4 \text{ cm}^3$, la velocidad de giro seleccionada es aquella para la que se quiere obtener la mejor respuesta del motor. Para seleccionar el valor 2,5 del parámetro K se ha tenido en cuenta la limitación de espacio para el diseño.. De entre todos los valores posibles de K, el de 2,5 es aquel que minimiza la longitud de los runners lo máximo posible, permitiendo al sistema ser más compacto.

Con todo esto, se obtiene un valor para la longitud de los runners de 11.32 inch o, lo que es lo mismo, 287.52 mm . Teniendo en cuenta que la longitud de la parte de conducto que está dentro de la culata es de 100 mm , queda una longitud de runner de $287.52 - 100 = 187.52 \text{ mm}$, que se ha redondeado a 188 mm .

No obstante, se ha tenido en cuenta esta longitud solamente como aproximación para el valor de diseño dado que existen algunos factores que convierten este problema en un problema

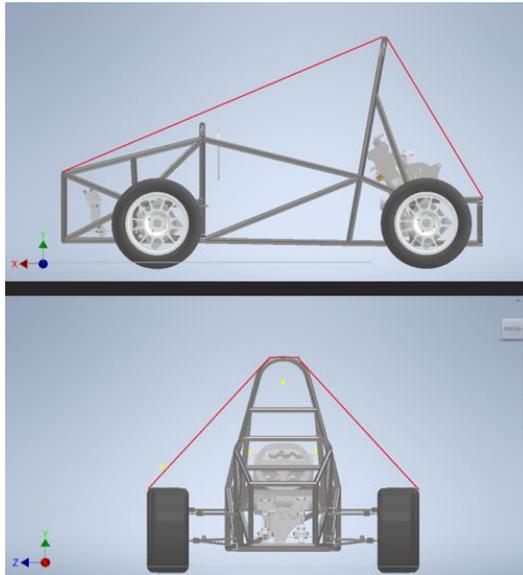
no lineal, cuando la ecuación de Helmholtz utiliza resonancia lineal. Entre estos factores encontramos los cambios de temperatura y/o presión. Además, la ecuación tiene en cuenta las revoluciones máximas, lo que puede llevar a curvas de par y potencia poco planas, es decir, que alcanzan un máximo en las revoluciones deseadas, pero decaen notablemente a partir de ahí. Para comparar el comportamiento de la longitud obtenida con la fórmula de Helmholtz y el resto de longitudes, se han establecido diferentes geometrías que varían tanto la longitud del plenum como de los runners, como se explica en los próximos apartados de este trabajo.

4.3 ESPACIO DISPONIBLE EN EL MONOPLAZA

A nivel geométrico, una de las mayores restricciones de diseño es la impuesta por el espacio disponible en el monoplaça. Y es que es un espacio pequeño como es la parte trasera del monoplaça, van incluidos muchos elementos como el propio motor, los colectores de escape, el depósito de gasolina, las distintas bombas, el diferencial, etc. que limitan el espacio restante para el sistema de admisión, así como la posición del motor, que directamente influye sobre la geometría de la admisión.

Como se ha mencionado en el apartado 4.2 de normativa, el *Surface envelope* también restringe el espacio disponible para la admisión. El optar por una admisión vertical permite tener márgenes más amplios que las de tipo lateral. Nótese en la ilustración 23 que, en nuestro monoplaça, a diferencia de la ilustración 14, la estructura más posterior del chasis se

encuentra más retrasada que la parte más posterior del neumático trasero. Esto es beneficioso para nosotros en términos de espacio disponible para el diseño.



*Ilustración 24: Surface envelope de nuestro monoplace
(Fuente: Elaboración propia)*



5. MATERIALES UTILIZADOS PARA SISTEMAS DE ADMISIÓN

Actualmente encontramos sistemas de admisión de tipos muy diferentes entre ellos, desde el hierro fundido que se empleaba tradicionalmente en muchos de los coches de producción hasta el plástico ABS que utilizan algunos prototipos de la FS. Las propiedades más importantes que debe tener un material para ser considerado para la fabricación de un sistema de admisión son:

- Densidad: una baja densidad (y por tanto baja masa) es vital en cualquier tipo de carrera automovilística. En nuestro caso tener un bajo peso ayuda a no elevar tanto el centro de gravedad del vehículo ya que nuestra admisión es superior, y a reducir la masa suspendida del vehículo. Estos dos factores están directamente relacionados con el comportamiento del coche.
- Resistencia al desgaste, la oxidación y la corrosión: podemos agruparlo como durabilidad.
- Precio: si bien no forma parte de las propiedades mecánicas del material sí que es de extrema importancia en cualquier empresa/equipo ya que al final del día es una de las mayores restricciones que existe. Con un presupuesto ilimitado y la investigación suficiente siempre se pueden desarrollar nuevas técnicas de vanguardia, sin embargo, en proyectos reales debe encontrarse un equilibrio entre esta característica y el resto de propiedades del material.
- Resistencia mecánica: en términos de fuerza y flexibilidad que le permiten aguantar los esfuerzos generados por el movimiento del vehículo, así como la presión de las ondas que se generan en su interior.
- Conductividad térmica: que ayuda a evitar el aumento de la temperatura de las paredes de la admisión, evitando así que lo haga la temperatura del aire de entrada al motor. Cuanto más caliente se encuentre el aire de entrada al motor, menor será su densidad y se reducirá la cantidad de oxígeno por unidad de volumen que llega al motor. Este factor es más relevante en automóviles comerciales cuya carrocería reduce el flujo de aire que “refrigera” las paredes de la admisión. En el caso de estudio de este TFG, no se considera un factor crítico porque la admisión en la parte vertical del monoplaza queda lo suficientemente expuesta como para que se refrigere suficientemente.

5.1 FUNDICIÓN

Tradicionalmente, se optaba por el acero fundido. Su facilidad de fabricación y bajo coste lo hacían un material idóneo para la época. Solo era en los vehículos de competición donde se optaba por otros materiales más ligeros como el aluminio. Para los vehículos de producción de aquella etapa de la industria de la automoción, su elevado peso no era considerado como un compromiso y su resistencia a la corrosión, su resistencia mecánica y su conductividad térmica eran suficientes.

5.2 ALUMINIO

Más tarde, con el objetivo de reducir peso, se introdujo el aluminio. El aluminio es apropiado porque no solo reduce el peso, sino que, debido a su buena conductividad térmica ayuda a disipar el calor más rápido.

5.3 ABS

El acrilonitrilo butadieno estireno es uno de los primeros materiales utilizados en la impresión 3D (fabricación aditiva). Es un material versátil, con muy buena formabilidad por la técnica de fabricación que usa (*Fused Deposition Modeling* generalmente) pero con unas propiedades mecánicas mejorables. Para mejorarlas, se puede añadir un refuerzo de capas de fibra de carbono al plástico impreso por FDM. La estructura es proporcionada por el ABS mientras que las propiedades mecánicas son aportadas por el refuerzo de fibra de carbono.

Cabe destacar que el ABS es un plástico poroso que, aunque se controle minuciosamente el proceso de impresión de la pieza (temperatura de inyección, calentamiento de la cama de inyección, presión...), siempre presenta esa porosidad. Esto, a pesar de suponer una desventaja para sus propiedades mecánicas y la estanqueidad de las piezas, aumenta su resistencia al calor cuando se refuerza con fibra ya que la resina impregna los poros de la pieza. Por ello es por lo que es una combinación que se puede aplicar en estos casos pese a tener el ABS una conductividad térmica bastante reducida en su forma inicial. Además, el ahorro en peso respecto al aluminio es considerable.

Asimismo, existen profesores y empresas cercanas a la universidad que pueden asesorar al equipo con la fabricación del ABS así como proveerlo con la fibra necesaria para la fabricación de la misma.

A pesar de tener un punto de fusión bajo (aprox 200°C) [7], es apropiado para esta aplicación debido a que las temperaturas alcanzadas en el plenum nunca son lo suficientemente altas como para llegar a fundirlo.

Por todo lo anterior, el plástico ABS con un refuerzo de fibra de carbono es la opción elegida para la futura fabricación del modelo de la admisión. Supone el equilibrio perfecto entre precio, peso y durabilidad.

5.3.1 FUSED DEPOSITION MODELLING

La fabricación aditiva por deposición fundida (FDM por sus siglas en inglés) fue una de las primeras tecnologías de fabricación aditiva que se utilizó. El ABS es uno de los materiales que se comenzó a utilizar (y se sigue utilizando) con esta tecnología de fabricación por su bajo punto de fusión, su ligereza, su resistencia al impacto y a la abrasión y su bajo precio. Es una tecnología extendida y con fácil acceso.

La tecnología FDM crea la pieza a partir del ABS en forma de filamento que es extruido hacia una boquilla caliente que calienta el material para fundirlo. La boquilla deposita el material fundido sobre las trayectorias establecida en el *slicer* (el programa utilizado para convertir el archivo .stl en instrucciones para la impresora 3D y donde se asignan los parámetros como la altura de capa o la densidad del relleno). Este proceso se realiza capa por capa y el material, al enfriarse, solidifica rápidamente y une las capas entre sí.

5.4 OTROS MATERIALES

Otros materiales cuyo peso y durabilidad les permite ser aplicados para colectores de admisión son:

- Compuestos de poliamida reforzada como el Nylon PA6 y PA66: la poliamida es un polímero con una excelente resistencia mecánica y estabilidad térmica, especialmente cuando se refuerza con fibras de vidrio o carbono. Utilizado de manera estándar en los coches de producción de algunas marcas generalistas como, por ejemplo, hace Ford en algunos motores *EcoBoost* [8].
- Materiales compuestos de fibra de carbono: ya mencionado con el refuerzo del ABS, es una tendencia en auge dentro de la industria. Reduce peso, aumenta rigidez y tiene

una adecuada durabilidad a altas temperaturas. Utilizado en coches de alto rendimiento como el Ferrari 488 Pista [9].

- Acero inoxidable: utilizado para colectores de admisión de directa donde sí se capta aire caliente. No se utilizan para los airbox de admisión.

A continuación, se muestra una comparativa cualitativa (cuantitativa en valores de densidad y conductividad térmica) de los principales materiales considerados para la fabricación:

Tabla 2: Características de los materiales de admisión

MATERIAL	ρ [g/cm ³]	K (W/m*K)	Durabilidad	Formabilidad	Propiedades mecánicas
Hierro fundido	6.8 – 7.8	40 - 60	Alta	Baja	Resistencia a compresión pero no a tracción, rígido y frágil en secciones delgadas
Aluminio	2.6 – 2.8	205 – 237	Media	Alta	Resistencia a tracción y flexión, dúctil.
Plástico ABS	1.0 – 1.2	0.17 – 0.3	Media	Alta	Tenaz, limitado frente a tracción y flexión
Plástico ABS reforzado con fibra de carbono	1.2 – 1.4	0.3 – 1.5	Alta	Media	Rígido, resistencia a tracción y flexión,

6. DISEÑO CAD

Como se menciona en el apartado 3.6, la toma de aire de la admisión es de tipo vertical. Basándose en la observación se ha decidido optar por un diseño inicial que, en forma, es similar a aquellos que otros equipos utilizan en la competición y de los que se tiene constancia que funcionan adecuadamente

Para entender qué cambios presentan unas geometrías simuladas respecto a las otras, se utiliza el siguiente esquema, donde cada color representa una parte distinta de la admisión (restrictor aparte):

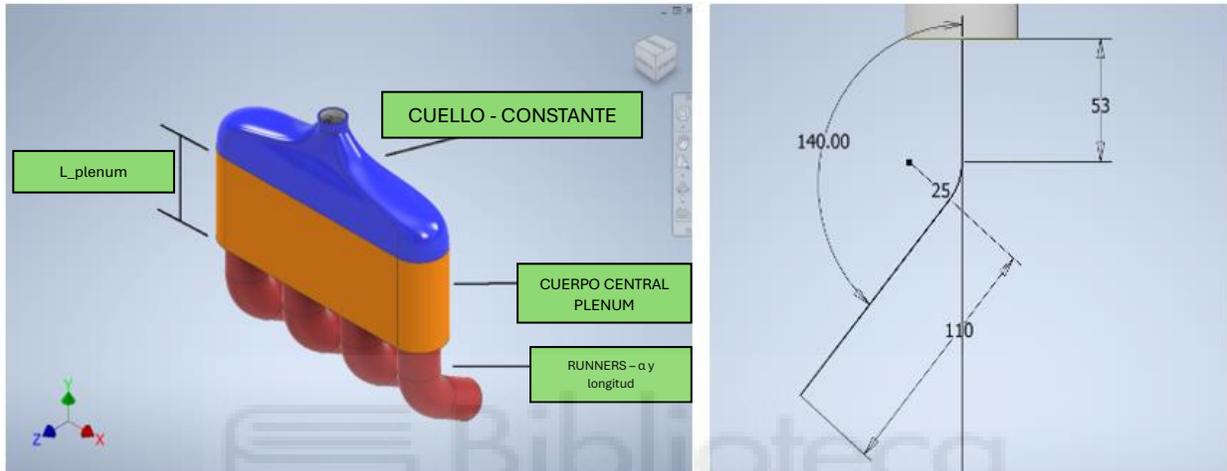


Ilustración 25: Partes de la admisión parametrizadas y boceto que parametriza los runners (Fuente: Elaboración propia)

Donde:

- El cuello se ha mantenido constante en todos los diseños estudiados
- El cuerpo central se ha parametrizado y su longitud (parámetro L_{plenum} en el programa) es la responsable de los distintos volúmenes de plenum estudiados. Los volúmenes estudiados han sido 1.5, 2.25 y 3 veces la cilindrada del volumen. Estos valores son los límites inferior y superior del rango recomendado en [2], así como un valor intermedio para comparar.
- Los runners también varían, tanto en longitud como en el ángulo entre el primer tramo y el segundo (ilustración 25). Las longitudes elegidas han sido; la obtenida con la ecuación de Helmholtz (188 mm), una más corta (148 mm) y otra más larga (228 mm). Los ángulos elegidos, como se ve en la tabla 2, han sido 130° y 140°, debido a que ángulos menores provocan demasiadas pérdidas de carga y ángulos mayores dejan la boca del restrictor en una posición demasiado vertical como para poder aprovechar la presión dinámica del aire en la entrada del restrictor.

Las posibles combinaciones de parámetros son:

$$\text{Combinaciones totales} = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 = 3 \cdot 3 \cdot 2 = 18$$

Tabla 3: Parámetros plenum y runners

Nº geometría	Longitud plenum (mm)	Volumen plenum (mm ³)	Longitud runners (mm)	Ángulo codo runners (°)
1	25	900000	188	140
2	25	900000	228	140
3	25	900000	148	140
4	25	900000	188	130
5	25	900000	228	130
6	25	900000	148	130
7 (ref.)	60	1350000	188	140
8	60	1350000	228	140
9	60	1350000	148	140
10	60	1350000	188	130
11	60	1350000	228	130
12	60	1350000	148	130
13	90	1800000	188	140
14	90	1800000	228	140
15	90	1800000	148	140
16	90	1800000	188	130
17	90	1800000	228	130
18	90	1800000	148	130

La geometría nº7 ha sido la elegida como referencia dado que su longitud de los runners es la calculada con la ecuación de Helmholtz y el volumen de su plenum es el valor intermedio entre 1.5 y 3 veces la cilindrada del motor.

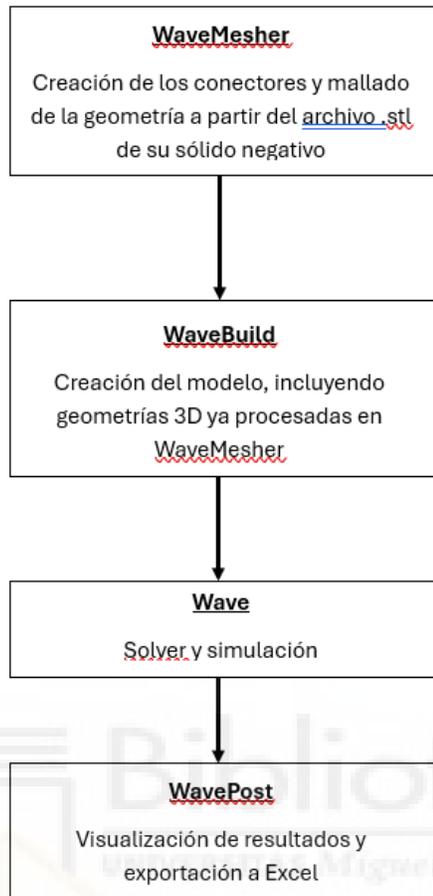
7. SIMULACIÓN 1D – RICARDO WAVE

Los programas de simulación unidimensional de motores son ampliamente utilizados para analizar el comportamiento y el flujo de gases de sistemas como son los MCIA. El software utilizado en este trabajo de fin de grado es Ricardo Wave.

Ricardo Wave permite modelar y simular motores, simular flujos de gases y obtener curvas de potencia, par, rendimiento o consumo de combustible, entre otros. Este tipo de software es tan utilizado en la industria automotriz ya que permite optimizar el diseño del motor sin necesidad de trabajar con el prototipo físico.

El programa cuenta con diferentes subprogramas llamados pre-procesadores, encargados de diferentes funciones:

- WaveBuild: módulo que sirve como pre-procesador y donde se construyen los modelos. Permite definir el sistema y la disposición de sus elementos. Entre sus elementos constructivos se encuentran cilindros, inyectores, válvulas, sensores, señales, compresores, turbinas, bombas...
- WaveMesher: procesa las geometrías 3D que se incluyen al modelo. Utiliza un archivo .stl del volumen interior del sólido. A partir de este archivo se definen los conectores de la geometría, es decir, las conexiones con el resto del modelo (en el caso del plenum: un conector en la entrada de aire y 4 conectores en los runners de salida del aire) en la pestaña *Geometry* y se malla en la pestaña *Body*.
- Wave: no es considerado un pre-procesador sino la interfaz principal del programa. En ella se corren las simulaciones y se accede al solver para incluir, por ejemplo, distintos regímenes de velocidad para los que simular. En esta interfaz se integra todo; el modelo construido en Build, la geometría mallada de Mesher...
- WavePost: procesador posterior a correr la simulación en Wave. En él aparecen los resultados de la simulación y permite exportar a diferentes formatos, entre ellos a Excel.



*Ilustración 26: Flujo de trabajo en Ricardo Wave
(Fuente: Elaboración propia)*

Para realizar el modelo del motor de la Honda CBR600 RR se podría modelar partiendo de cero, utilizando los elementos mecánicos que el programa ofrece, así como sus “Flow Elements” y los modelos 3D del restrictor, plenum y runners. Sin embargo, dado que el subprograma WaveBuild tiene entre sus librerías un ejemplo de un motor de 600 cm^3 , se ha decidido partir de este modelo inicial y modificar aquellos elementos donde nuestro sistema de admisión se diferencia. El modelo fue, según los desarrolladores de WaveBuild [10], construido especialmente para que los equipos de FS tuvieran un punto de partida para la puesta a punto y optimización de sus estudios.

La apariencia inicial del modelo es la siguiente:

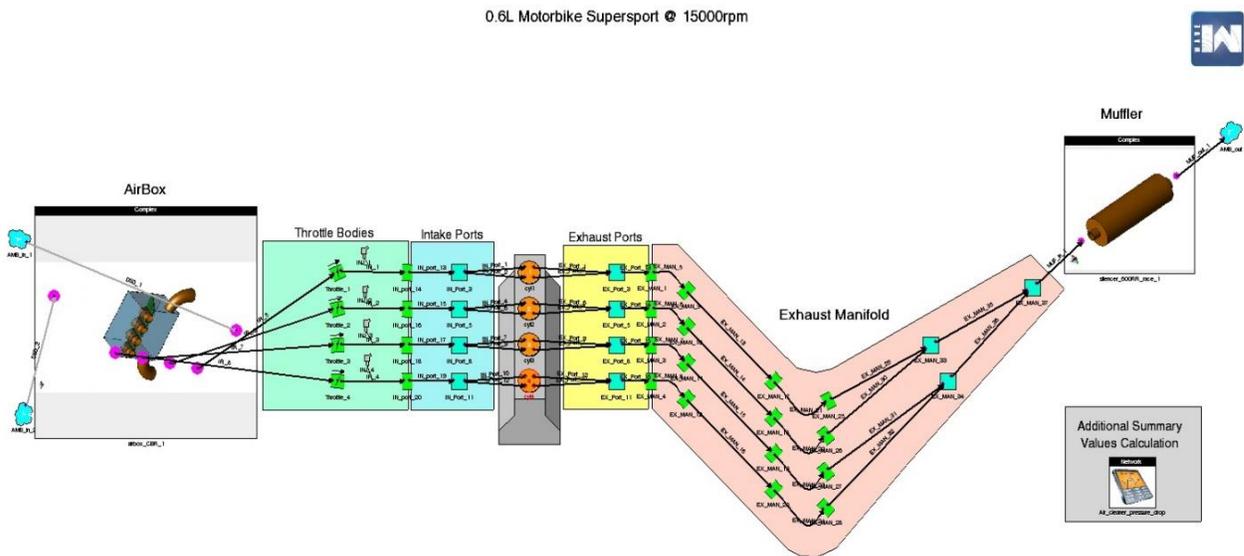


Ilustración 27: Modelo inicial en interfaz de Wavebuild (Fuente: Elaboración propia)

Nótese que, aunque el modelo es una buena aproximación para la simulación, muchos de los elementos presentes en esta primera aproximación deben ser adaptados a los del motor de la Honda CBR600 RR.

7.1 ELEMENTOS ADAPTADOS

Para comenzar la adaptación de las características del motor se deben eliminar las cuatro válvulas de mariposa que el esquema original ofrece. En nuestro caso, tal y como se ha explicado previamente, se utiliza una única válvula de mariposa.

Además, el *airbox* del modelo (que por el nombre interno del archivo parece estar basado en el de algún modelo de Honda CBR) se retira para utilizar el diseñado en este trabajo.

Por otro lado, el modelo inicial utiliza un elemento *Ambients* para cada una de las dos entradas que tiene el *airbox*, pasando a ser solamente uno.

Del mismo modo, se han eliminado los conductos que guían el aire hacia las entradas del *airbox*, para más tarde incluir 4 elementos distintos que modelan las distintas secciones del restrictor de aire.

Tanto los colectores de escape como el silencioso permanecen intactos por considerarse óptimos para el punto en el que se encuentra nuestro proyecto.

7.2 ELEMENTOS MECÁNICOS

7.2.1 BLOQUE MOTOR

Accediendo a la pestaña *Model > Engine* de la barra superior podemos modificar las características del motor, que para el caso estudiado queda:

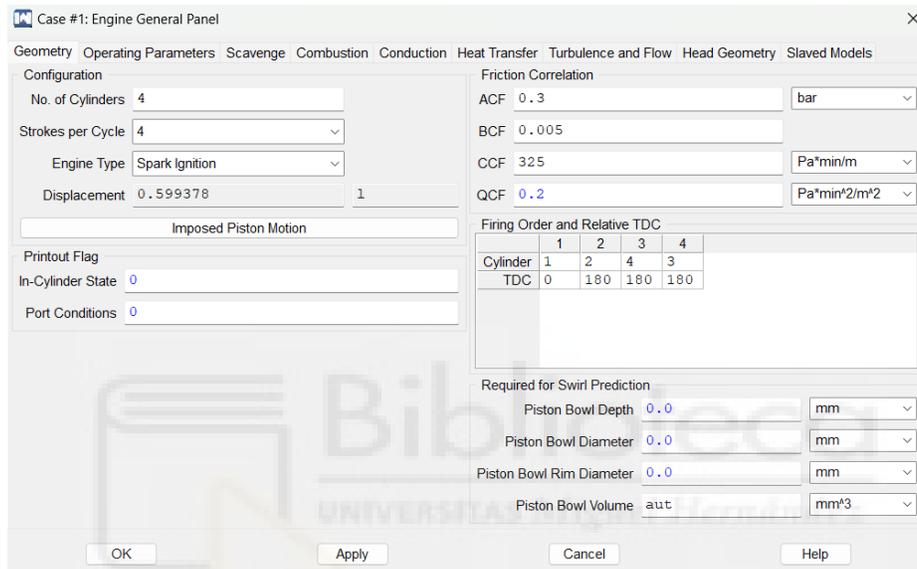


Ilustración 28: Panel general del motor (Fuente: Elaboración propia)

Con:

- Nº de cilindros: 4.
- Carreras por ciclo (tiempos del motor): 4.
- Tipo de motor: encendido por chispa.
- Cilindrada del motor: 599 cm³.
- Orden de encendido: 1 – 2 – 4 – 3.

El orden de encendido, así como otros datos que se introducen más adelante han sido consultados en el manual de taller de la Honda CBR600 RR [11].

ENGINE		
	Cylinder arrangement	4 cylinders in-line, inclined 38° from vertical
	Bore and stroke	67.0 X 42.5 mm (2.64 X 1.67 in)
	Displacement	599 cm ³ (36.5 cu-in)
	Compression ratio	12.0: 1
	Valve train	Chain driven, DOHC
	Intake valve	opens at 1 mm (0.04 in) lift
		closes at 1 mm (0.04 in) lift
	Exhaust valve	opens at 1 mm (0.04 in) lift
		closes at 1 mm (0.04 in) lift
	Lubrication system	Forced pressure and wet sump
	Oil pump type	Trochoid
	Cooling system	Liquid cooled
	Air filtration	Paper element
	Engine dry weight	(‘03, ‘04) 58.3 kg (128.5 lbs)
		(After ‘04) 58.7 kg (129.4 lbs)
	Firing order	1 - 2 - 4 - 3

Ilustración 29: Especificaciones motor Honda CBR600 RR (Fuente: [11])

Los coeficientes del apartado “Friction Correlation” de la ilustración 37 han sido ajustados en este modelo respecto de aquellos que el programa utiliza por defecto, según lo revisado en otros trabajos sobre motores de 4 cilindros [12]. El programa utiliza una forma modificada de la correlación de Chen-Flynn cuyos coeficientes se obtienen de forma experimental. ACF es un término constante e independiente de la velocidad o la carga. BCF es linealmente dependiente de la presión máxima del cilindro. CCF varía también linealmente con la velocidad del pistón y tiene en cuenta la fricción hidrodinámica en el cilindro. Por último, QCF varía cuadráticamente con la velocidad del pistón y tiene en cuenta las pérdidas de carga en el cilindro.

En el resto de pestañas de la barra superior se puede seguir ajustando el comportamiento del motor con opciones relativas a la turbulencia del flujo, la transmisión de calor, etc. Se ha optado por mantener los valores del modelo original.

7.3 ELEMENTOS DE FLUJO

Elementos de flujo son todos aquellos que el programa llama “Flow Elements” e incluye desde cilindros hasta inyectores pasando por las válvulas, los conductos de admisión y escape, etc.

7.3.1 CILINDROS

Según lo consultado en el manual de taller, el diámetro de la camisa del cilindro es de 67 mm , la carrera es de $42,5\text{ mm}$ y la altura de la cámara de combustión es de $2,8\text{ mm}$. Además, es un motor con 4 válvulas por cilindro, siendo 2 de ellas para admisión y 2 para escape. En el apartado “Piston” se han ajustado la relación de compresión (12:1) y la longitud de la biela a 88 mm .

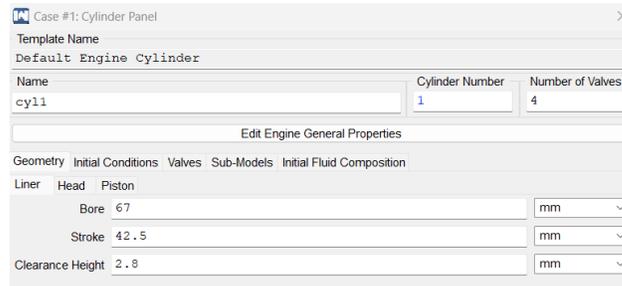


Ilustración 30: Panel del cilindro (Fuente: Elaboración propia)

7.3.2 RESTRICTOR

Se estudia el restrictor por separado del plenum de admisión debido a que entre estos dos elementos existe una válvula de mariposa. La representación de estos elementos por separado y la adición de una válvula de mariposa independiente (posibilidad del programa) consiguen que la simulación sea más cercana a la realidad de lo que lo sería si se estudiara todo como un único elemento. De acuerdo con el plano del cuerpo del acelerador de AT Power (Anexo 2), se ha simulado el restrictor como un cuerpo dividido en 4 tramos, algunos de ellos introducidos como conductos (*Ducts*) y otros como orificios (*Orifices*). El primero de ellos, es un conducto con un diámetro de 28 mm al inicio y 24 mm al final, con una longitud de 53 mm . El segundo de ellos comienza en 24 mm y termina en 20 mm , con una longitud de 58 mm . El tercero de ellos es una sección circular constante de diámetro 20 mm y longitud 5 mm . El último de ellos comienza en 20 mm y acaba en 24.159 mm (el diámetro exacto en el paso del restrictor al plenum), con una longitud de 34 mm .

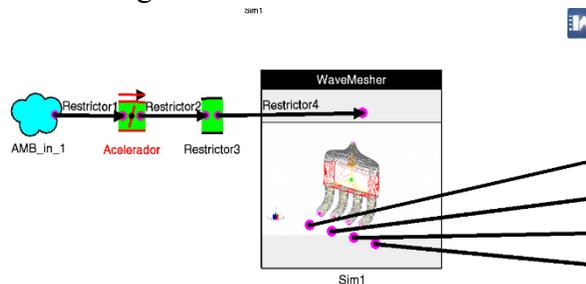


Ilustración 31: Modelo del restrictor (Fuente: Elaboración propia)

7.3.3 VÁLVULAS

Los elementos como la válvula de mariposa (*Throttle Valve*) necesitan antes crear una válvula en la pestaña superior *Model > Valves*. De entre las muchas opciones que el programa ofrece, se elige la válvula de mariposa y se coloca entre el primer y el segundo tramo del restrictor. Los parámetros asignados se han obtenido de los planos del cuerpo del acelerador de AT Power, visibles en el Anexo 2. Aunque utilice la tecnología *Shafiless*, se le ha asignado un valor pequeño al *Shaft Diameter* para representar la restricción de flujo que, aunque no incorpore un eje, la presencia de la propia válvula supone. Esto se ve en el valor de *Valve Angle for Maximum Open Area*. Con el valor de *Actual Plate Angle* se ajusta cómo de abierta se encuentra la válvula, siendo 0° completamente cerrada y 90° completamente abierta (85.904° en esta simulación).

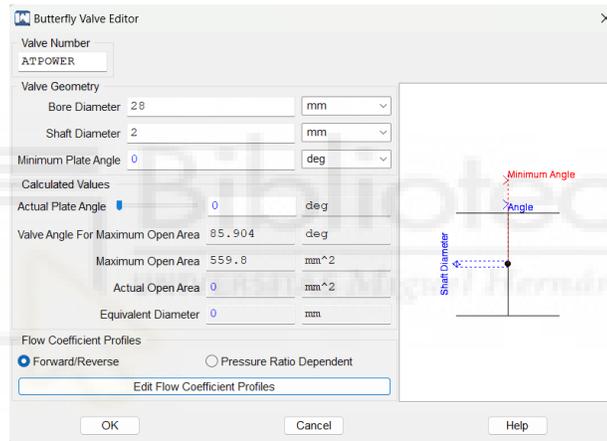


Ilustración 32: Editor de la válvula de mariposa (Fuente: Elaboración propia)

Cuando se modela en WaveBuild, las válvulas de admisión se crean automáticamente cuando se enlazan los cilindros con las uniones en forma de Y, explicadas más adelante. Su diámetro es de 24.88 mm y el perfil de alzado de válvula se ha mantenido el indicado por el programa.

7.3.4 INYECTORES

Se han mantenido los del modelo por defecto y se ha utilizado una relación aire/combustible de 14.7:1 (estequiométrica). Esta relación se ha mantenido constante para todos los casos de cada simulación. La posición de inyección ideal para mejorar la mezcla del combustible con el aire es el final del runner, lo más cercano posible al inicio del conducto de admisión que ya está dentro de la culata. Esto se explica siguiendo el principio de Venturi, según el cual sabemos que el diferencial de presión generado al estrecharse la sección ayuda a aspirar

mejor la mezcla. Al mismo tiempo, y siguiendo el mismo principio, el aumento de velocidad ayuda a atomizar el combustible en pequeñas gotas.

7.3.5 UNIONES EN FORMA DE Y

Este elemento de flujo lo utiliza el programa para la intersección de conductos. Estas uniones permiten simular las situaciones en las que se están combinando diferentes trayectorias, que sucede tanto en las válvulas de admisión como en las de escape (1 par de cada una de ellas presente en cada cilindro).

La unión en forma de Y representa el punto donde el conducto único de admisión se divide en 2 conductos diferentes, cada uno de los cuales dirige el flujo hacia una de las válvulas de admisión. Debido a la imposibilidad de realizar las mediciones en el motor real debido a que aún no se dispone de él, se han consultado en otros trabajos [12] sobre este motor los valores de longitud, diámetro y orientación de estos conductos, que son los siguientes:

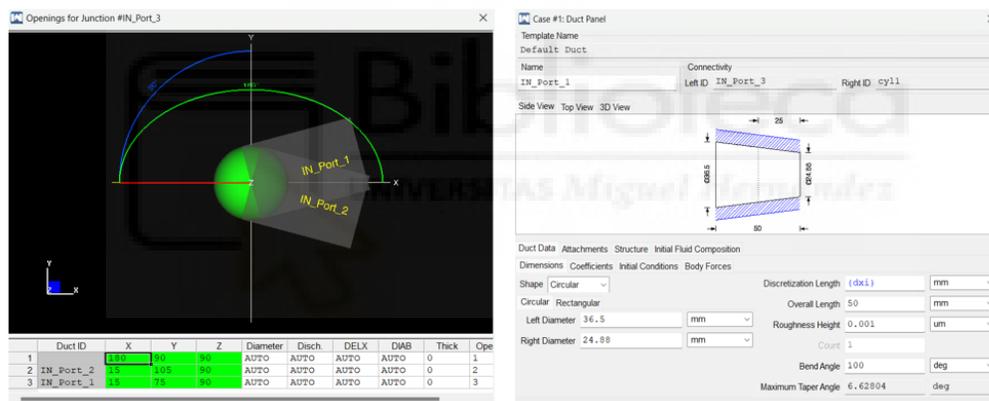


Ilustración 33: Uniones en Y (Fuente: Elaboración propia)

Al seleccionar *AUTO* en los valores de diámetro y coeficiente de descarga, el programa utiliza los valores de las secciones de entrada y de salida (diámetro de los runners y diámetro de *IN_Port_1* e *IN_Port_2*). Los diámetros inicial y final de los conductos de las válvulas son de 36.5 y 25.88 mm respectivamente, el ángulo de curvatura es de 100°, la distancia total de 50 mm. La discretización es la práctica de coger la geometría modelada y dividir el gran volumen único en sub-volúmenes más pequeños. En cada uno de estos sub-volúmenes, el programa resuelve para cada paso temporal las ecuaciones de conservación de la masa y la energía. El valor se ha introducido como un vector (se definen escribiéndolos entre llaves) de valor igual a 30 mm para todos los casos. Cuanto mayor sea la longitud de discretización, mayor es el tiempo que el programa tarda en simular. El módulo de esta longitud se ha

establecido de acuerdo a lo consultado en la ayuda de Ricardo Wave [10], donde se establece que la relación entre la longitud de discretización (dx) y el diámetro del cilindro (B), debe ser:

$$dx = 0.45B$$

7.3.6 ELEMENTO AMBIENTE

Este elemento representa una conexión a lo que el programa llama depósito infinito (atmósfera) a una presión, temperatura y composición del aire determinadas. Los campos de entrada incluyen la descripción de las condiciones ambientales y la composición del aire de entrada. La composición del aire de entrada se expresa en tanto por 1, en función de las fracciones de aire fresco, combustible vaporizado, aire quemado, combustible quemado y combustible líquido del fluido al inicio. Para las simulaciones, se ha establecido en 1 *bar*, 300 *K* y 1 de aire fresco (totalidad de aire fresco) en la entrada a la admisión y en 1 *bar*, 300 *K* y la siguiente relación de aire y combustible quemado:

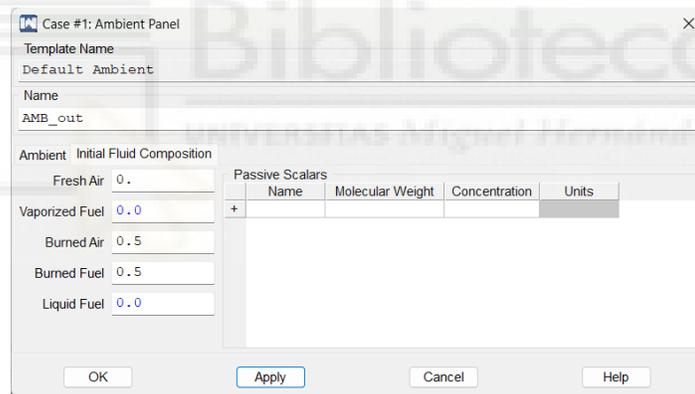
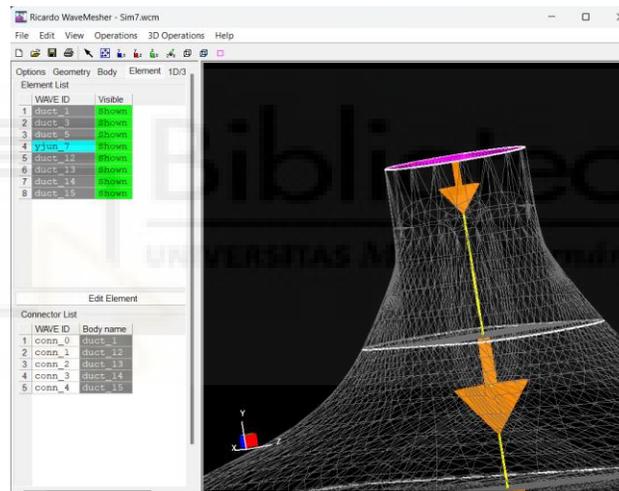


Ilustración 34: Elemento "Ambient" (Fuente: Elaboración propia)

7.4 GEOMETRÍA IMPORTADA DE LA ADMISIÓN

Para añadir la geometría mallada en WaveMesher a nuestro modelo en WaveBuild, seleccionamos la opción *Elements > Components > File Reference* e importamos el archivo .wcm correspondiente a cada simulación.

El sub-programa WaveMesher, al fin y al cabo, se encarga de convertir la geometría CAD compleja que le es introducida en distintos elementos que él es capaz de procesar, que aparecen en la lista de la pestaña *Element* (ver ilustración 35). Para ello necesita que el usuario manualmente seleccione diferentes planos que corten a la geometría y le indiquen donde separar unos elementos de otros. La pestaña *Body* es la que contiene estos planos, y permite elegir planos paralelos a los ejes del origen de coordenadas, planos arbitrarios, con un desfase respecto a los planos de origen o a un plano anteriormente creado, etc.



*Ilustración 35: Pestaña "Element" de WaveMesher
(Fuente: Elaboración propia)*

Previamente, es importante establecer las secciones de entrada y salida del aire de la admisión como conectores. Para ello, mediante *Geometry > Connector > Set Face to Connector*, se eligen las caras correspondientes a estas secciones de entrada y salida.

En la ilustración 36 se muestra el contenido de las pestañas *Geometry* y *Body*.

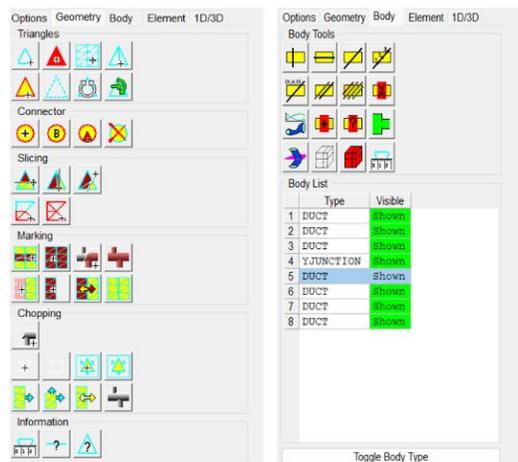


Ilustración 36: Pestañas "Geometry" y "Body"
(Fuente: Elaboración propia)

7.5 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DEL MOTOR

Más allá de los elementos mecánicos y de flujo que el programa necesita para construir el modelo, están los parámetros que rigen la simulación. Ricardo Wave permite simular tanto para régimen transitorio como para régimen estacionario. A pesar de que el régimen transitorio podría aportar unos valores más precisos de la simulación, se ha optado por simular en régimen estacionario debido a la dificultad de encontrar dependencias entre la variación del tiempo (o de velocidades del motor) y el cambio de valor de los parámetros como presión o temperatura.

De cara a tener una idea del comportamiento del motor en cada régimen de revoluciones, se ha establecido un vector $\{Speed\}$ con incrementos de 1000 *rpm*. A su vez, se han definido 13 casos distintos para cada simulación, de forma que se simule en todo el rango de revoluciones donde funciona el motor. Aunque no se prevé que el motor llegue a trabajar hasta 15000 *rpm* como hace en la moto original, se ha incluido en la simulación para ver cómo se comportaría en caso de llegar a trabajar en ese régimen. Además, en la pestaña donde se definen estos vectores y constantes, se han incluido algunos que no venían con el modelo original, como el ratio aire/combustible estequiométrico o la duración de la simulación de 50 ciclos para evitar tiempos de simulación extremadamente altos. A su vez, se han conservado otros vectores y constantes del modelo original:

- *AFR*: relación aire combustible.

- *CA50*: describe el ángulo del cigüeñal (después del PMS) para el que se ha liberado el 50% del calor de la combustión. Cuanto más rápido gira el motor, menor es el ángulo del *CA50*.
- *BDUR* es la duración (en grados) de la combustión.
- Los vectores que empiezan con *Coolant_* se corresponden con la transferencia de calor al refrigerante desde la cabeza del pistón y la camisa. Cuanto mayor es el régimen de giro del motor, más calor se transmite.
- *dxe* y *dxi* son constantes de la discretización del programa.
- *idur* es la duración de la simulación (50 ciclos).
- El resto de temperaturas son de aceite, refrigerante, válvula de admisión y válvula de escape.
- *EX_ANCHOR* y *INT_ANCHOR* (medidos en grados) son parámetros relacionados con el cruce de válvulas de escape y admisión, respectivamente.

Status	Name	Units	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4		Case 5		Case 6		Case 7		Case 8		Case 9		Case 10		Case 11		
			Full load	Run																					
1	SPEED	rpm	15000	14000	13000	12000	11000	10000	9000	8000	7000	6000	5000	4000	3000	2000	1000	500	200	100	50	25	12.5	6.25	3.125
2	AFR		14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	
3	BDUR	deg	30	29	28	27	26	25.2	24.5	23.8	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	
4	CA50	deg	0	0.8	1.8	2.9	4	5.2	6.4	7.6	8.8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
5	Coolant_Head	W/m^2/K	13000	12000	11000	10000	9000	8500	8000	7500	7000	6500	6000	5500	5000	4500	4000	3500	3000	2500	2000	1500	1000	500	
6	Coolant_Liner	W/m^2/K	3700	3500	3300	3050	2800	2500	2300	2000	1700	1500	1200	1000	800	600	400	200	100	50	25	12.5	6.25	3.125	
7	Coolant_Pisto	W/m^2/K	3100	3000	2900	2600	2500	2400	2100	1900	1500	1400	1300	1100	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100	
8	dxe		35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	
9	dxi		25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	
10	EV_TEMP	K	381	380	378.5	377	376	375	372.5	370	368	366	365.5	365	364	363	362	361	360	359	358	357	356	355	
11	EX_ANCHOR	deg	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	
12	HEAD_TEMP	K	636	635	632.5	630	625	620	607.5	595	587.5	580	565	550	535	520	505	490	475	460	445	430	415	400	
13	idur		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
14	INT_ANCHOR	deg	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	
15	IV_TEMP	K	321	320	320	319	318	318	317	316	315	314	313	312	311	310	309	308	307	306	305	304	303	302	
16	LINER_TEMP	K	620	615	608	600	597.5	595	587.5	580	575	570	565	560	555	550	545	540	535	530	525	520	515	510	
17	PISTON_TEMP	K	598	595	590	585	582.5	580	565	550	540	530	515	500	490	480	470	460	450	440	430	420	410	400	
18	T_cell	K	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	
19	T_coolant	K	393	394	393	393	388	383	378	373	368	362	357	352	347	342	337	332	327	322	317	312	307	302	
20	T_oil	K	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	
21	throttle_angle	deg	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90		

Ilustración 37: Pestaña "Constants" (Fuente: Elaboración propia)

La ventana de *Simulation Control* permite definir otros aspectos de la simulación; como el número de ciclos deseados para la simulación, la tolerancia para la convergencia de los resultados en la simulación o las propiedades del fluido a simular (en este caso: *Indolene*, que es un combustible utilizado para simular propiedades parecidas a la gasolina con un modelo de compresibilidad de gas ideal, que es el recomendado por el programa para simulaciones de motores de encendido por chispa con velocidades de simulación razonables).

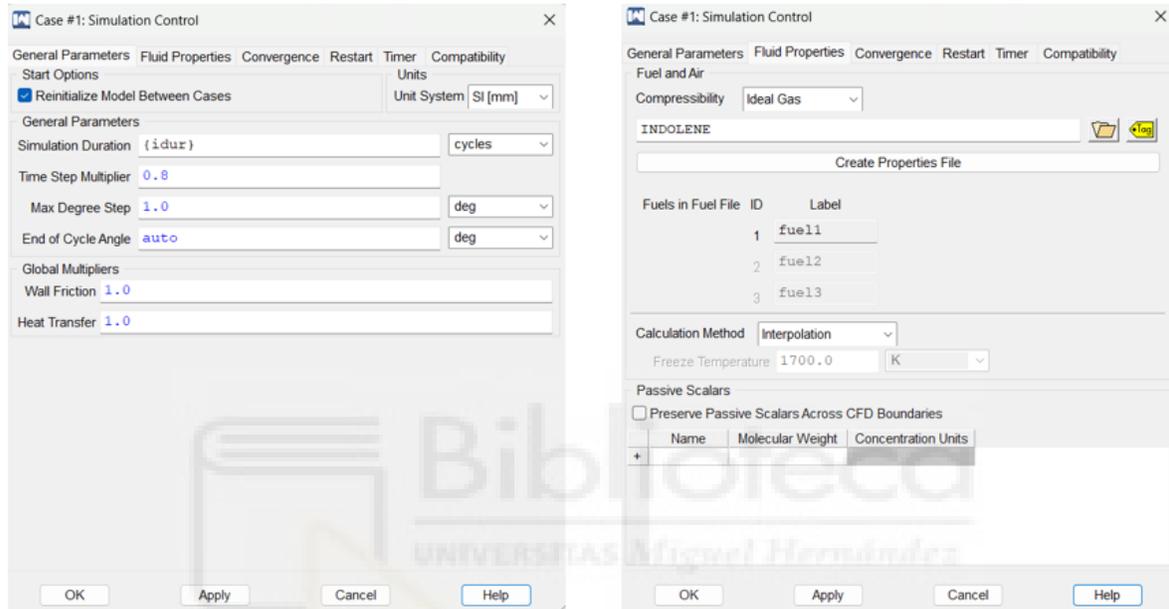


Ilustración 38: Editor del alzado de la válvula (Fuente: Elaboración propia)

Por otro lado, la ventana *Model > Valves* permite ajustar el perfil del alzado de las válvulas. Se ha mantenido por defecto, por considerarse el perfil que el propio modelo lleva incorporado adecuado para la simulación.

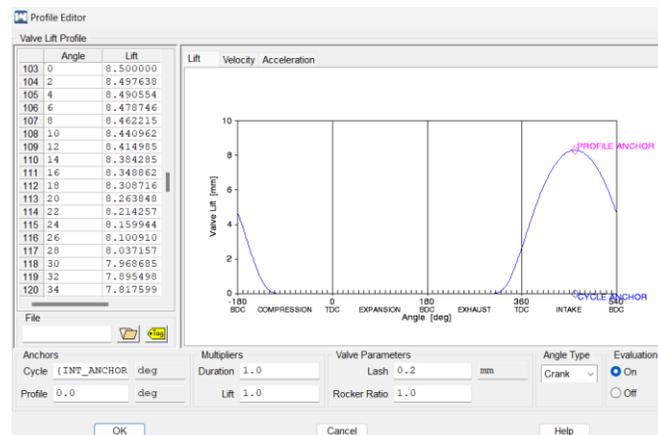


Ilustración 39: Ventana de control de la simulación (Fuente: Elaboración propia)

La apariencia del modelo final en la interfaz de WaveBuild es la siguiente:

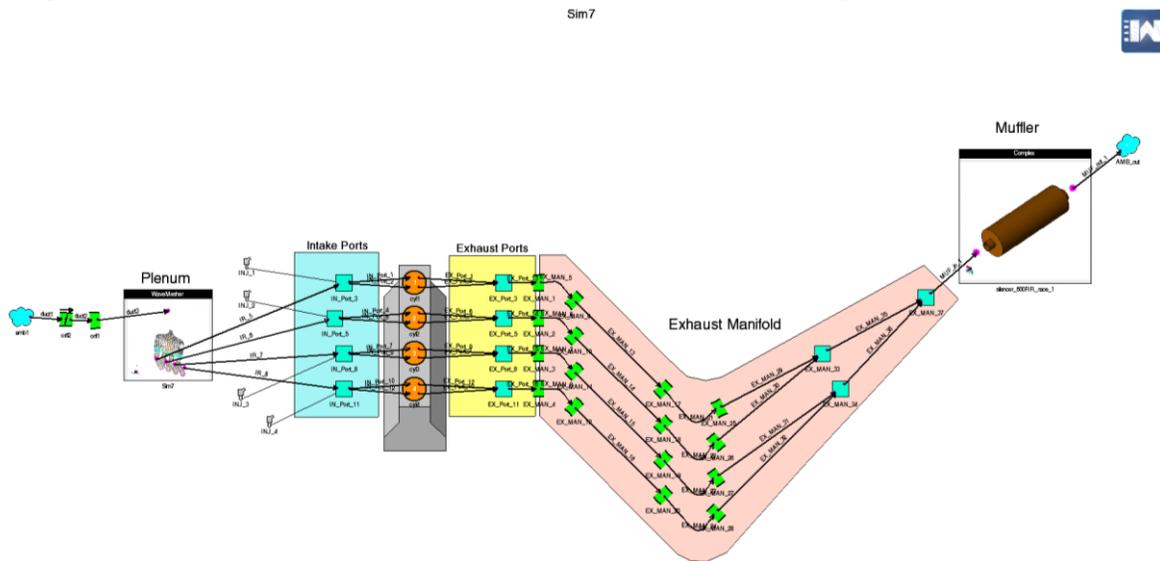


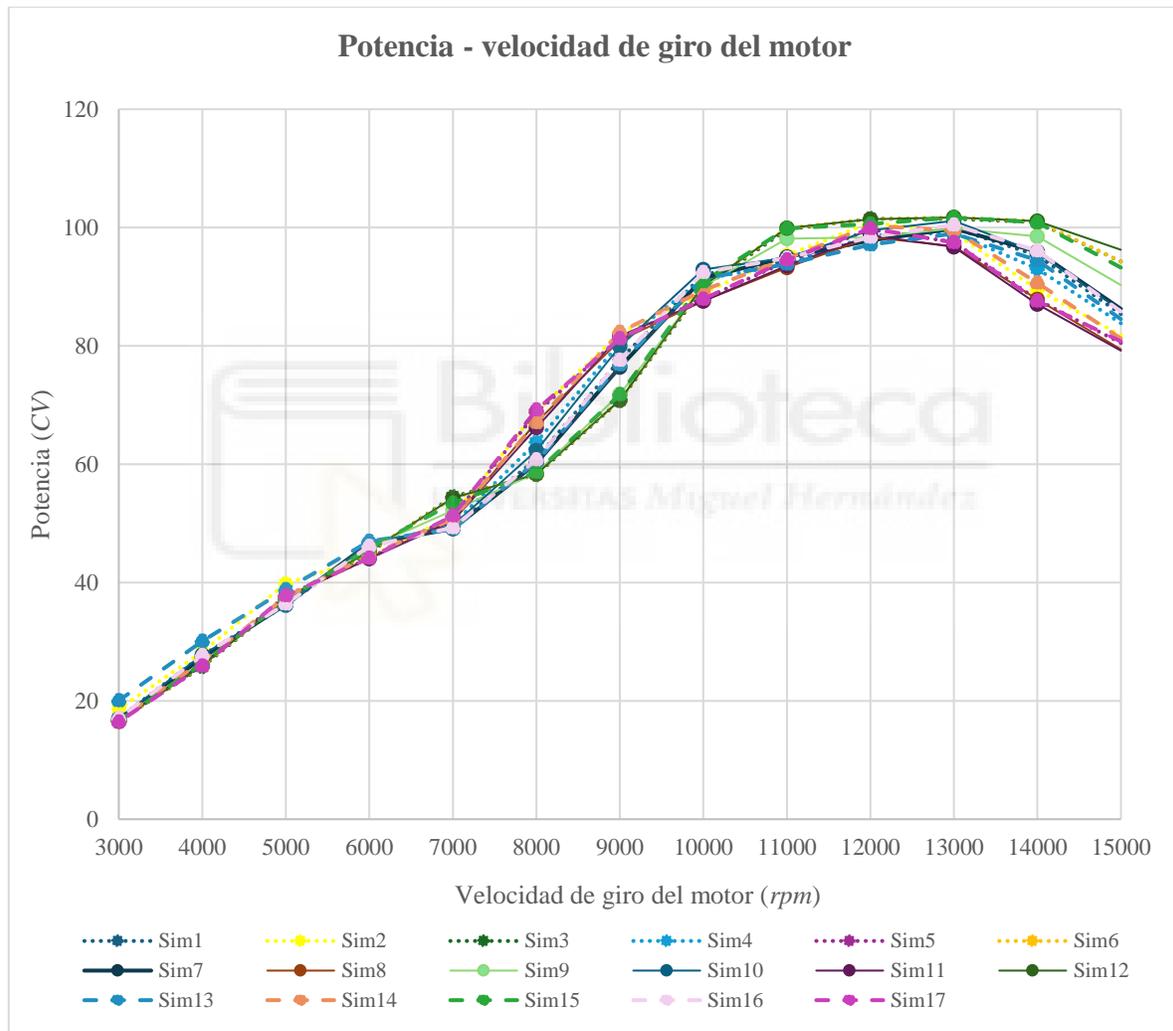
Ilustración 40: Modelo del motor en WaveBuild (Fuente: Elaboración propia)



8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se ha explicado en el apartado 5, se han corrido 18 simulaciones para comprobar el comportamiento del sistema de admisión con diferentes características geométricas. Los resultados de la simulación 18 han sido descartados dado que colisiona con el arco de seguridad y es imposible ensamblarla en el monoplaza. A continuación se presentan las gráficas de potencia, par y eficiencia volumétrica junto con su discusión:

Gráfica 1: Potencia vs velocidad de giro del motor

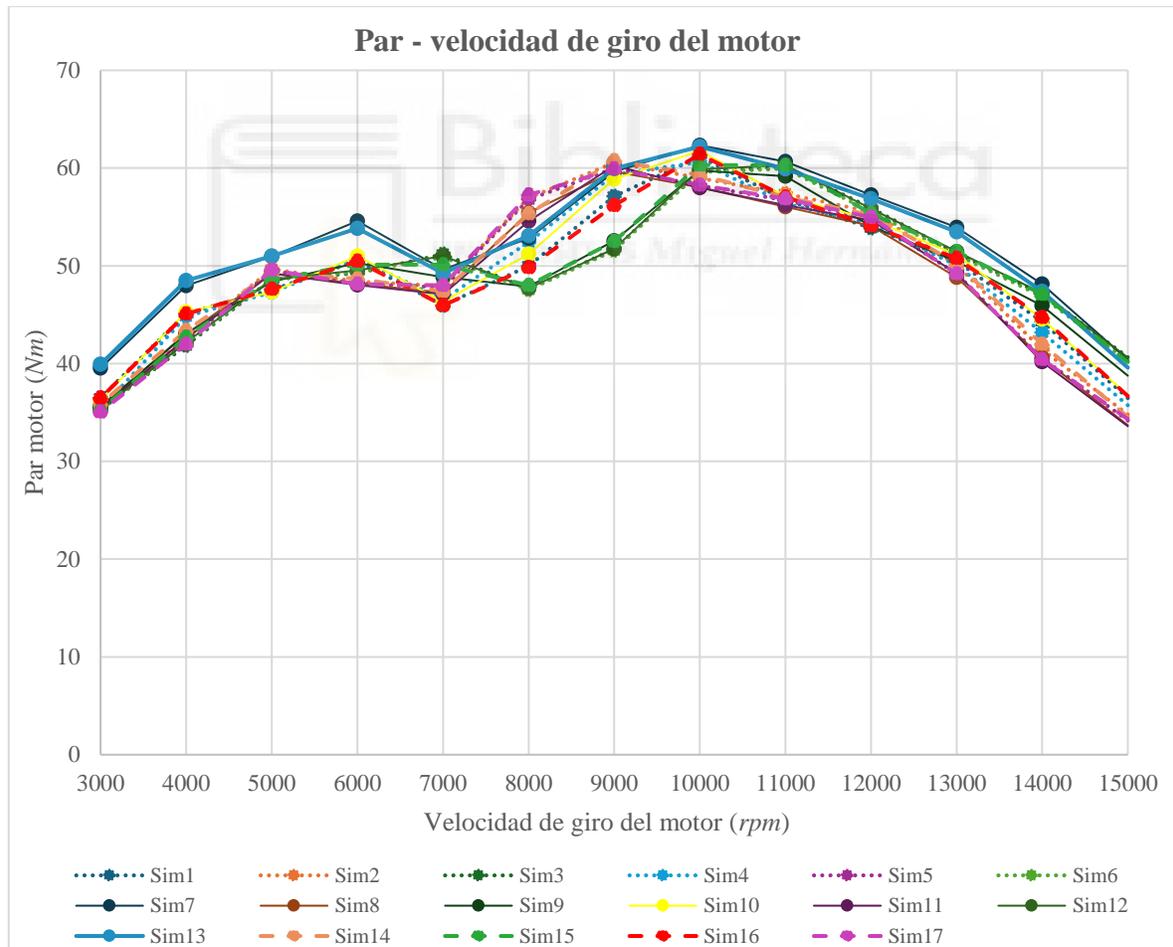


Se observa cómo la mayoría de simulaciones entregan la potencia de manera similar, especialmente al inicio de la gráfica, donde se encuentran muy parejas. A partir de las 7000 rpm, se aprecia cómo los comportamientos comienzan a diferenciarse. Existen mayores

diferencias cuando la longitud de los runners varía que cuando lo hace el volumen del plenum. Esto se desarrolla más en profundidad en los apartados 8.1 y 8.2.

Entre las 7000 y las 9500 rpm, volúmenes del plenum más grande que el de referencia consiguen mejores cifras de potencia. A partir de las 9500 rpm, independientemente del volumen, los runners más cortos ofrecen las mejores cifras de potencia. El hecho de que comiencen a funcionar mejor a altas revoluciones se debe a que, en los regímenes más lentos, el aire desplazado por la onda generada por el cierre de la válvula de admisión abandona el runner antes de que vuelva a ser aspirada de nuevo por el cilindro. Cuando el motor sube de vueltas y esta aspiración es más rápida, el aire no tiene tiempo de abandonar el runner y las longitudes cortas pasan a funcionar mejor.

Gráfica 2: Par vs velocidad de giro del motor

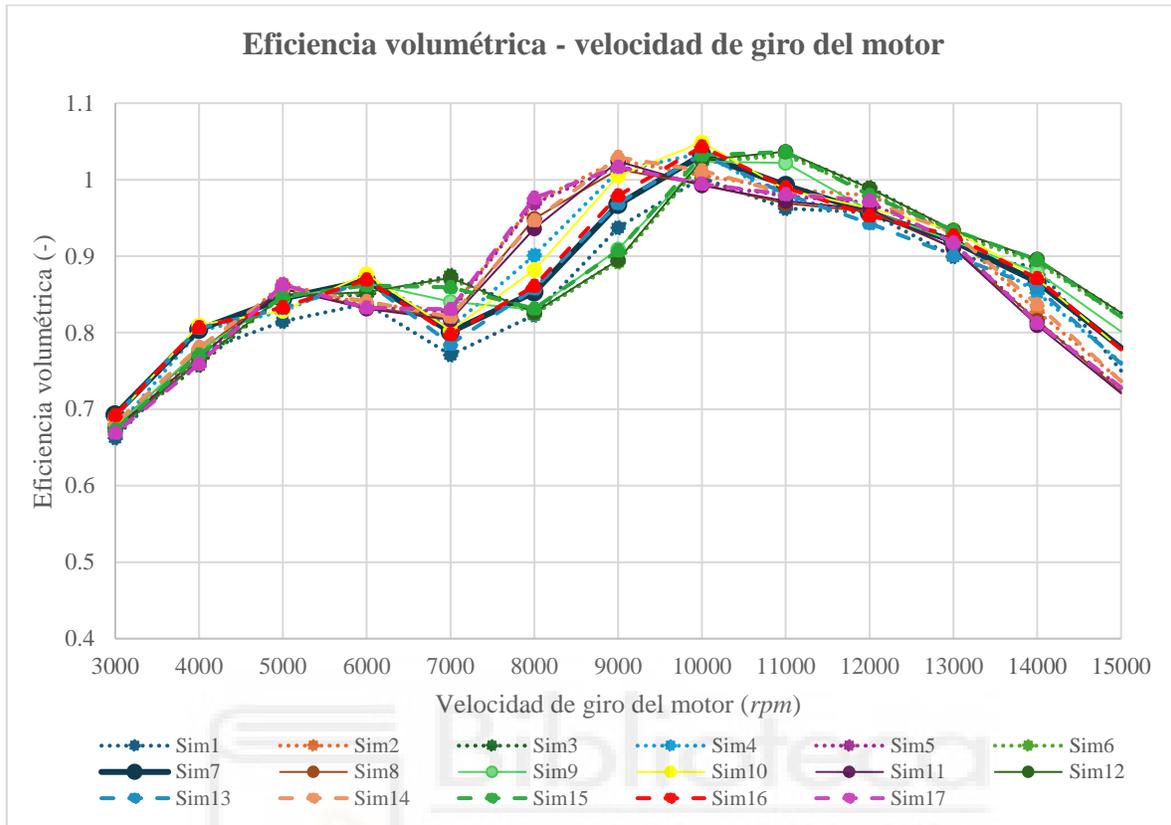


Respecto a las cifras de par, hasta las 7000 *rpm*, las longitudes de Helmholtz con volumen iguales o mayores al de referencia (geometrías 7 y 13) ofrecen claramente las mejores cifras. No siendo así para la geometría 1. Se deduce que, para funcionar correctamente, la longitud obtenida con la ecuación del resonador necesita un volumen mínimo de aire encerrado.

De la misma manera que ocurre con la potencia, entre las 7000 y las 9000 *rpm*, los runners más largos comienzan a funcionar mejor. Para el par, a partir de estas 9000 *rpm*, a diferencia de la potencia, no son los runners cortos los que tienen el mejor funcionamiento a altas vueltas sino los de Helmholtz. De esta forma, son los runners con la longitud de Helmholtz los que ofrecen más par en la mayor parte del rango de revoluciones estudiado.

Para las 7000 *rpm*, se observa en todas las simulaciones un punto donde o bien se estancan o bien presentan un mínimo relativo. Esto puede implicar que las 7000 *rpm* supongan un punto de transición entre los modos de resonancia de las ondas del sistema. Esto explicaría que el comportamiento del motor vuelva a estabilizarse por encima de esta velocidad de giro. También podría indicar que, por el cruce de válvulas, la succión conseguida con los gases de escape esté siendo contraproducente. Esto ocurriría si, con el adelanto de la apertura de la admisión o el retraso del cierre de escape, se estuviese escapando mezcla fresca por las válvulas de escape. Dado que no existe certeza de que esto sea así, en los trabajos futuros (apartado 9) se comenta una posible forma de estudiar el fenómeno.

Gráfica 3: Eficiencia volumétrica vs velocidad de giro del motor



Se percibe que las gráficas de par y eficiencia volumétrica son similares en forma. Esto se debe a que cuanto más eficientemente se llene el cilindro, más oxígeno disponible para la combustión habrá y más par será capaz de generar en el cigüeñal. No obstante, que el rendimiento volumétrico se convierta en par depende de otros factores como, por ejemplo, el cruce de válvulas o la turbulencia generada por las contrapresiones de la apertura y el cierre de la válvula de admisión. Esto hace que las curvas, aunque similares en forma, presenten diferentes valores y no sea realmente reconocible ninguna dependencia entre la variación del volumen o la longitud.

Sí se observa que, al comparar cómo afecta el ángulo de los runners a la eficiencia volumétrica, las geometrías que tienen ángulos menores consiguen mejores valores de eficiencia volumétrica. Esto es fácilmente apreciable comparando la geometría 7 (ref.) contra la 13. Esto evidencia que el llenado del cilindro es mejor cuanto más paralela al suelo esté colocada la toma de admisión del sistema y que la ganancia de eficiencia volumétrica de

colocar la toma así es mayor que las pérdidas de carga que puede suponer tener el ángulo más pequeño.

En base a la forma de los circuitos de las pruebas de FS, se busca que el motor sea capaz de entregar el máximo par lo antes posible. También, se busca que alcance su potencia máxima cerca del límite superior del rango de revoluciones. A su vez, se requiere una entrega tanto de potencia como de par lo más progresiva posible, evitando picos abruptos que afectan negativamente a la manejabilidad del coche.

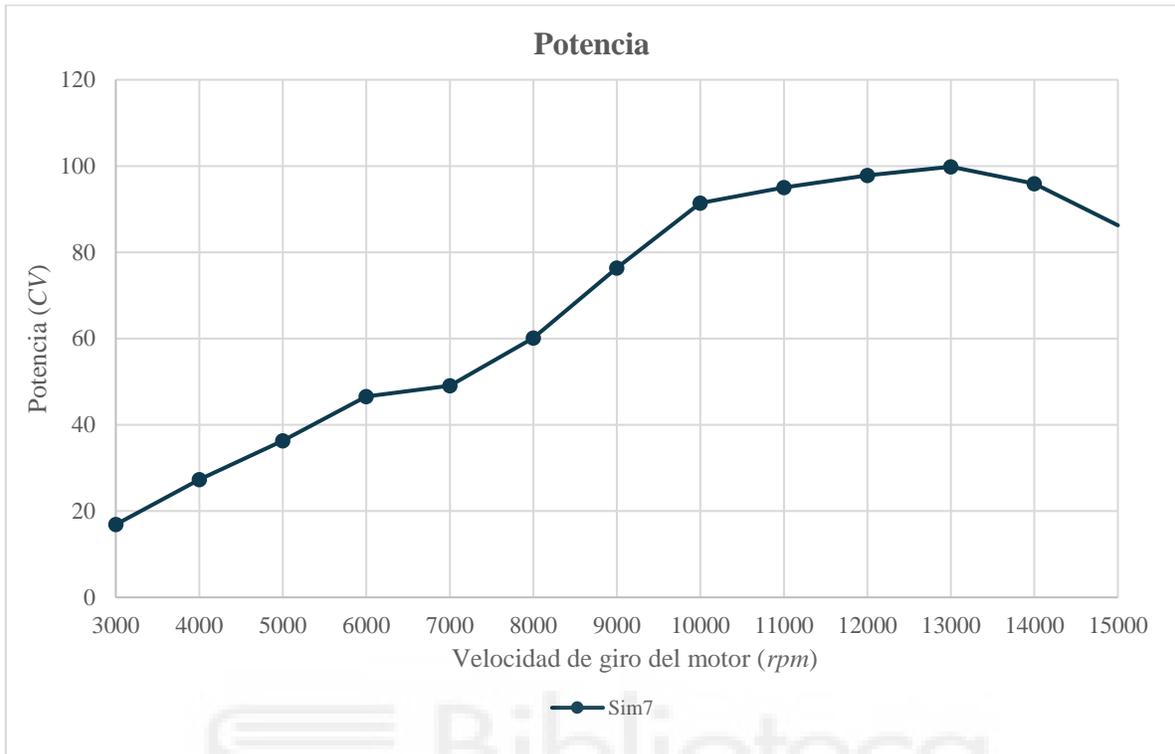
Teniendo en cuenta todo lo expuesto en este apartado, finalmente se ha elegido la geometría número 7 como diseño final. Esta geometría supone el mejor compromiso entre potencia y par, a velocidades de giro tanto bajas como altas. Garantiza las mejores cifras de par a lo largo de casi todo el rango, sin penalizar excesivamente en el rango entre 7000 y 9000 *rpm*, único momento donde es superada. En términos de potencia, también es el compromiso perfecto ya que su entrega es muy progresiva y crece hasta las 13000 *rpm*.

A continuación, una tabla comparativa entre el motor equipado con la admisión original y con el nuevo diseño, así como las gráficas obtenidas para la potencia, el par y la eficiencia volumétrica de la geometría 7.

Tabla 4: Potencia y par originales vs nuevo diseño (Fuente de los datos originales: *duerote.it*)

	Motor <i>Honda CBR600 RR</i> original	Motor con el nuevo diseño de admisión
Potencia	86 kW (116.9 CV) / 13000 <i>rpm</i>	99.8 CV / 13000 <i>rpm</i>
Par motor	66 Nm / 11000 <i>rpm</i>	62.3 Nm / 10000 <i>rpm</i>

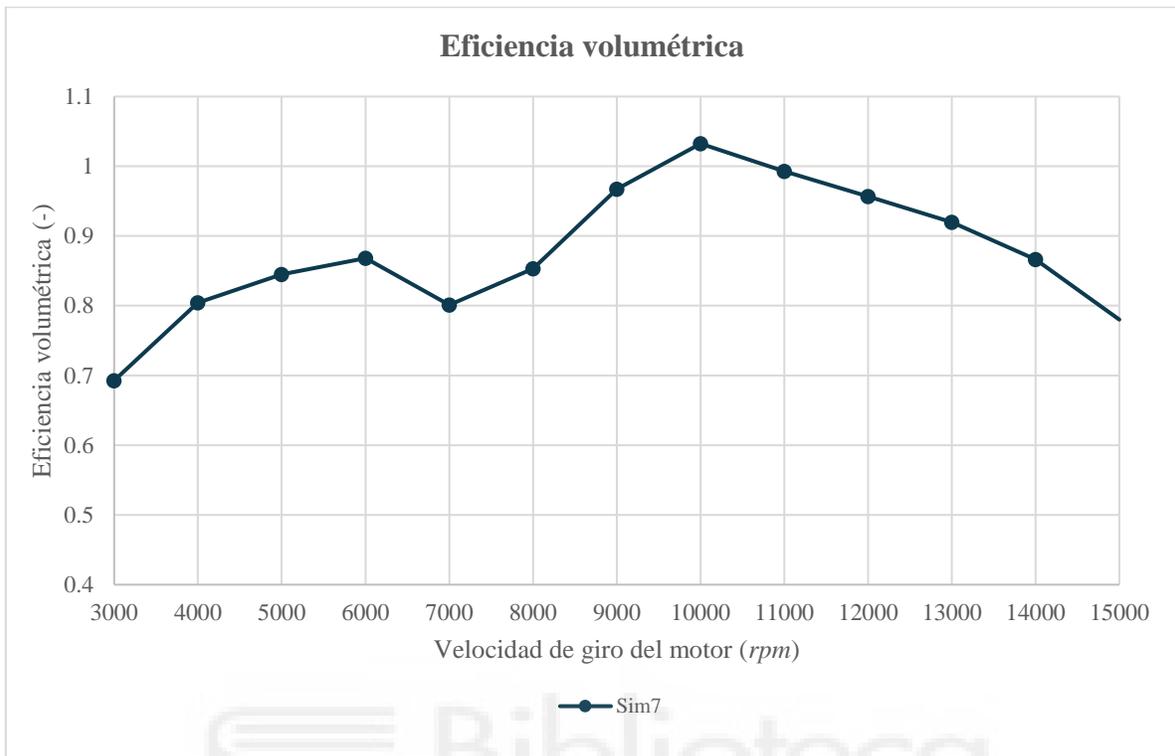
Gráfica 4: Potencia obtenida de la geometría 7



Gráfica 5: Par obtenido de la geometría 7



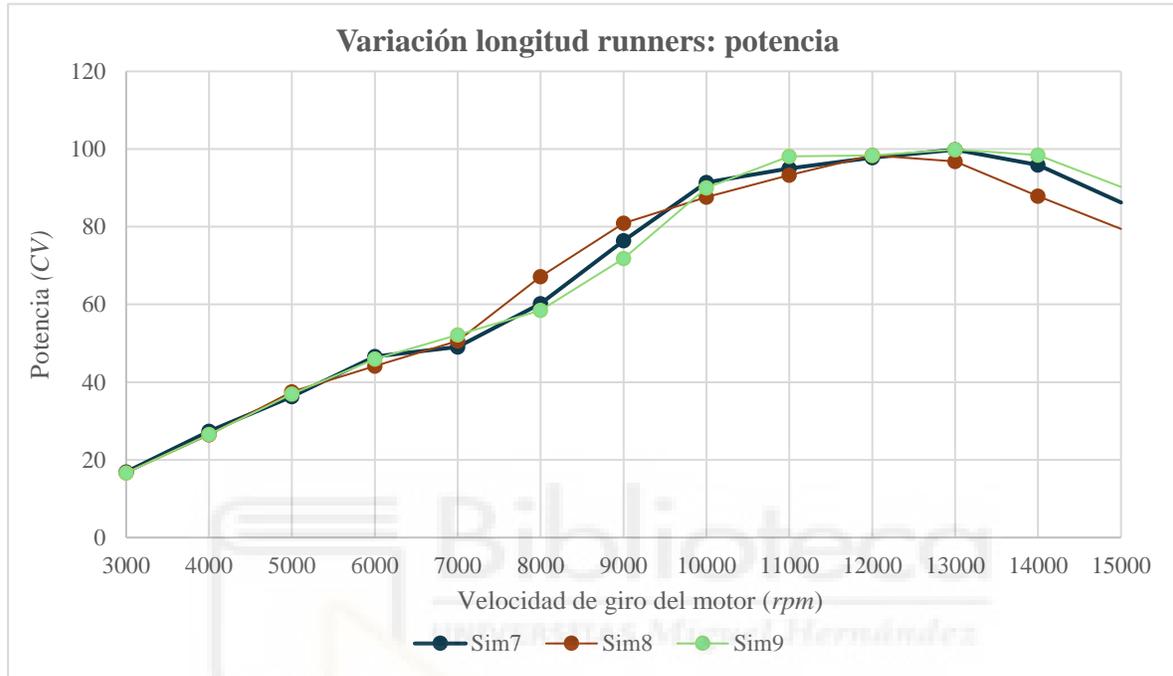
Gráfica 6: Eficiencia volumétrica obtenida de la geometría 7



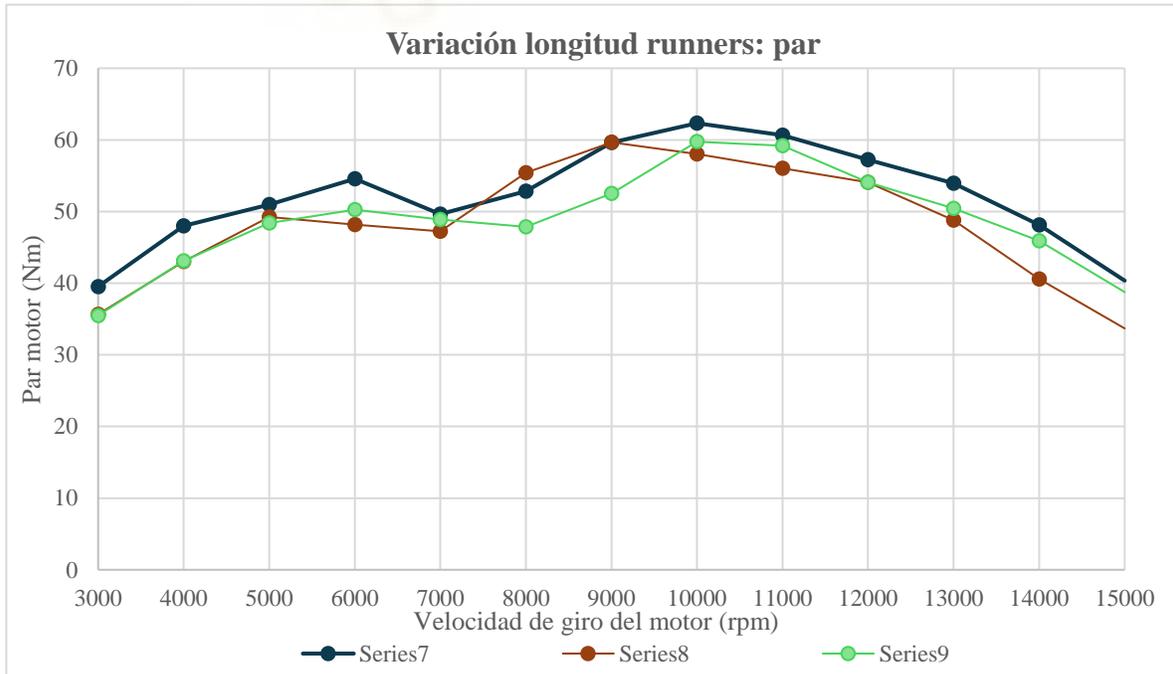
8.1 VARIACIÓN LONGITUD DE LOS RUNNERS

Comparando configuraciones que solo se diferencian en sus longitudes de runners, se puede observar cómo afecta la longitud al rendimiento del motor. Para ello se ha utilizado la geometría 7 como referencia (longitud calculada con ecuación de Helmholtz e igual a 188 mm) y las geometrías 8 y 9 (228 y 148 mm respectivamente). Los resultados obtenidos son:

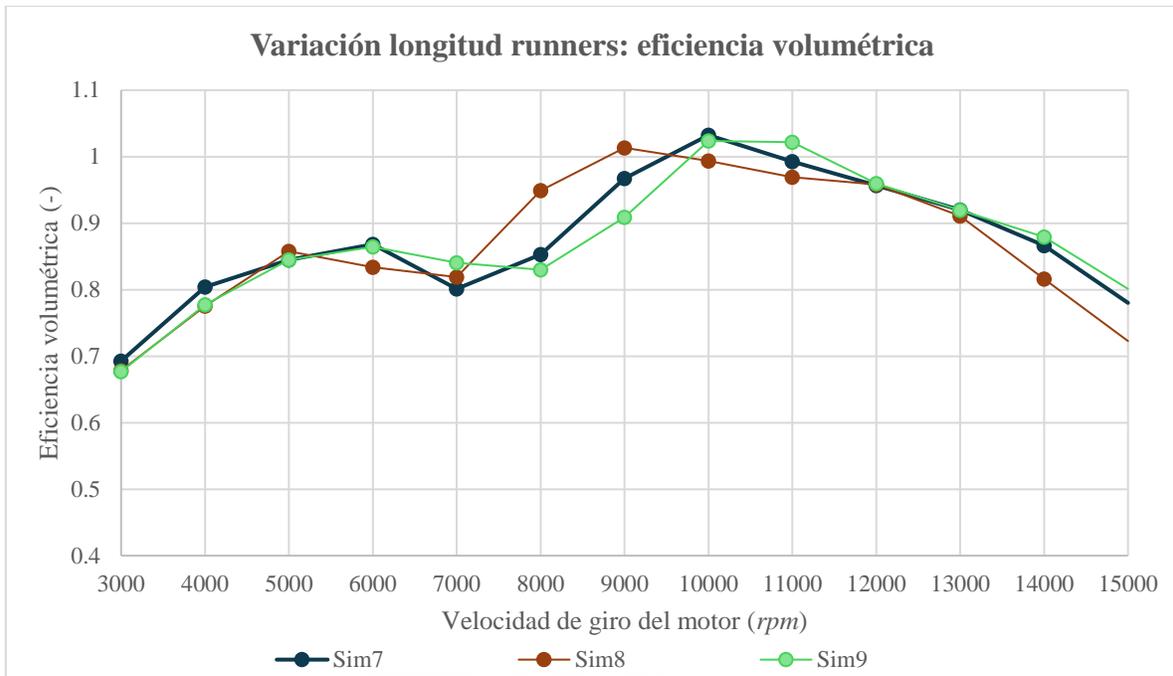
Gráfica 7: Variación de la potencia con la longitud de los runners



Gráfica 8: Variación del par con la longitud de los runners



Gráfica 9: Variación de la eficiencia volumétrica con la longitud de los runners



En términos de potencia, las 3 longitudes se comportan de manera muy parecida hasta las 7000 rpm. A partir de este punto, hasta aproximadamente las 9500 rpm, longitudes por encima de la de Helmholtz ofrecen más potencia, mientras que longitudes menores no superan la entrega por la de Helmholtz. De las 9500 rpm en adelante, la tendencia se invierte; longitudes menores pasan a ser las que consiguen mejor rendimiento y longitudes mayores afectan negativamente a la potencia, manteniéndose siempre la de Helmholtz entre medias de una y otra.

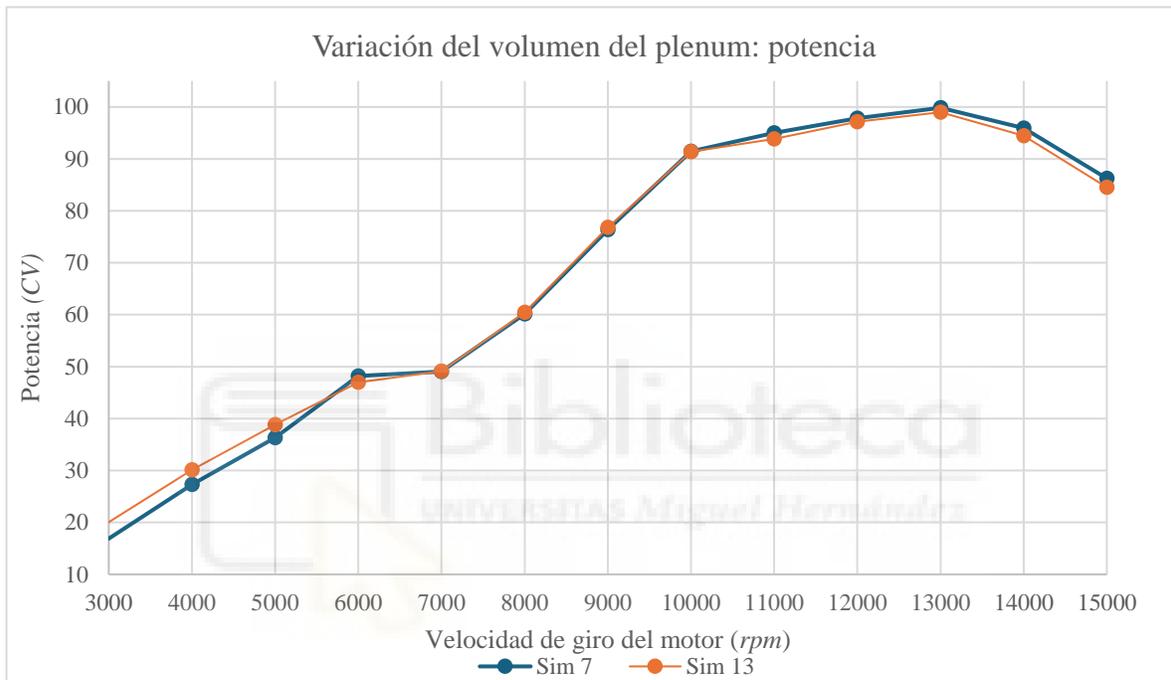
Al observar las gráficas de par y eficiencia volumétrica, se reconocen de nuevo formas muy parecidas. Si bien en forma son similares, se observa cómo la longitud de Helmholtz es la que ofrece los valores más altos en casi todo el rango en la curva de par, independientemente de la velocidad de giro del motor, solo siendo superada por la simulación 8 en el tramo entre las 7500 y las 9000 rpm. Pese a su estrecha relación, la curva de eficiencia volumétrica presenta algunas diferencias respecto a la de par. Sus 3 simulaciones se encuentran bastante parejas cuando el motor gira a bajas vueltas y es en el tramo entre las 7000 y las 9000 rpm donde los runners más largos ayudan a llenar mejor el cilindro. A partir de las 10000 rpm, los runners largos dejan de ser tan efectivos y empiezan a ser contraproducente su uso. A su vez,

no se observan diferencias notables entre el llenado de los cilindros con la longitud de referencia (nº7) o una menor (nº9).

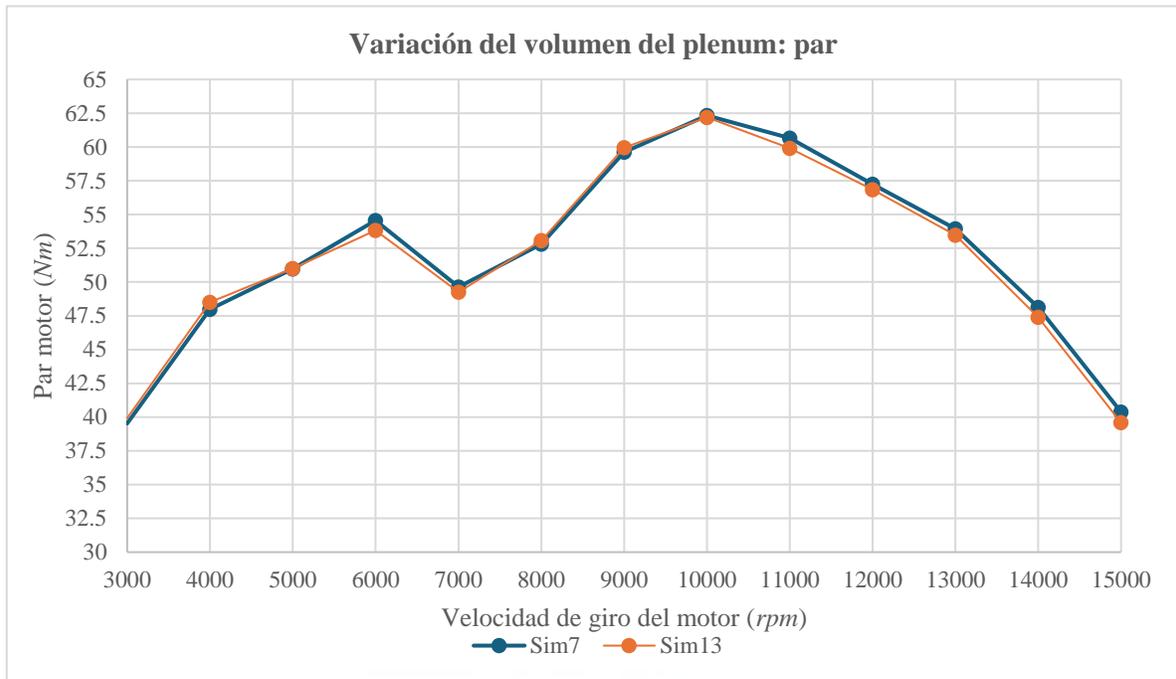
8.2 VARIACIÓN DEL VOLUMEN DEL PLENUM

Comparando de nuevo la configuración 7 con, en este caso, la 13, que tiene su misma longitud de los runners y el mismo ángulo, pero cambia el volumen del plenum (2.25 y 3 veces la cilindrada respectivamente), se obtiene:

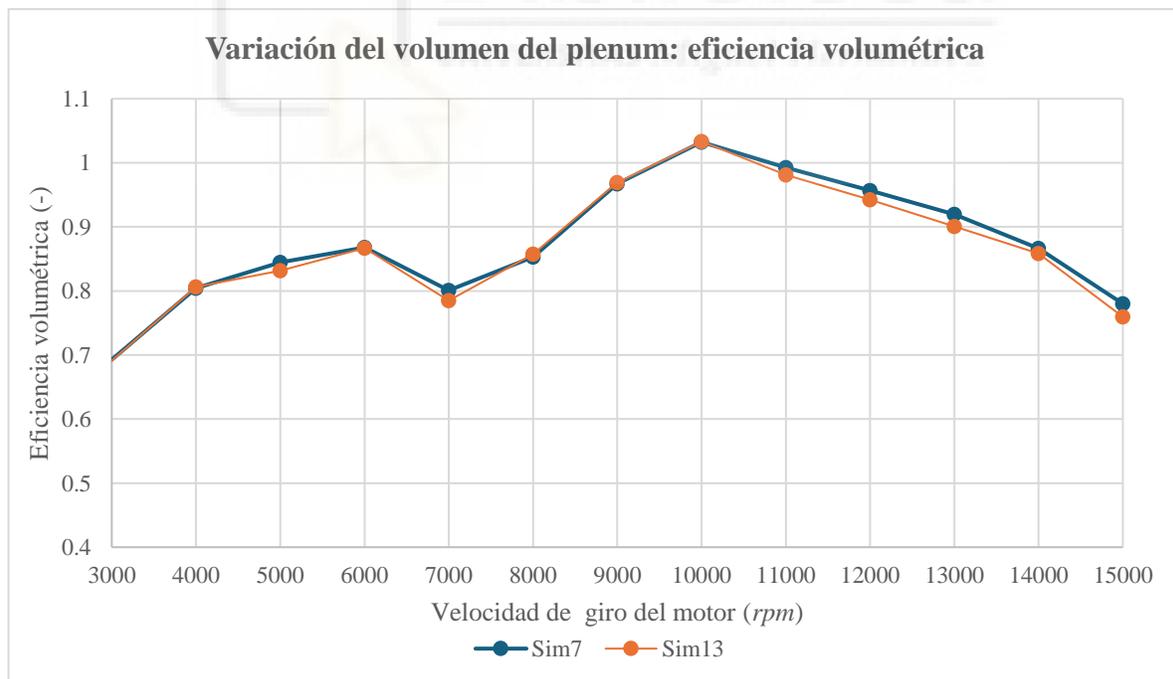
Gráfica 10: Variación de la potencia con el volumen del plenum



Gráfica 11: Variación del par con el volumen del plenum



Gráfica 12: Variación de la eficiencia volumétrica con el volumen del plenum



Se observa que, a bajas vueltas, el plenum más grande (simulación 13) consigue mayor potencia, par y eficiencia volumétrica, aunque el incremento en estas dos últimas es mínimo. Sin embargo, cuando el régimen de revoluciones empieza a aumentar, parece que la respuesta de un plenum más pequeño es ligeramente mejor. Esto ocurre, como ya se ha mencionado en el apartado anterior con los runners largos, debido a que el aire encerrado dentro del pequeño sufre menos los efectos de inercia que en el grande. Al desplazarse una masa de aire mayor, los efectos se acentúan más y su comportamiento se vuelve más “perezoso”. La velocidad a partir de la que se invierten estas tendencias y el plenum de volumen más pequeño empieza a funcionar mejor es 10000 rpm.

El valor máximo lo alcanza la simulación 7 (Helmholtz) tanto en potencia, par y rendimiento volumétrico. No obstante, las diferencias entre una y otra configuración son pequeñas y la forma de las curvas es similar, encontrándose prácticamente superpuestas en algunos puntos. Esto se debe a la similitud entre las geometrías, que tienen en común tanto el cuello como el ángulo y la longitud de los runners. Nótese que la variación del plenum no repercute en el rendimiento de manera tan notable como lo hace la variación de los runners.

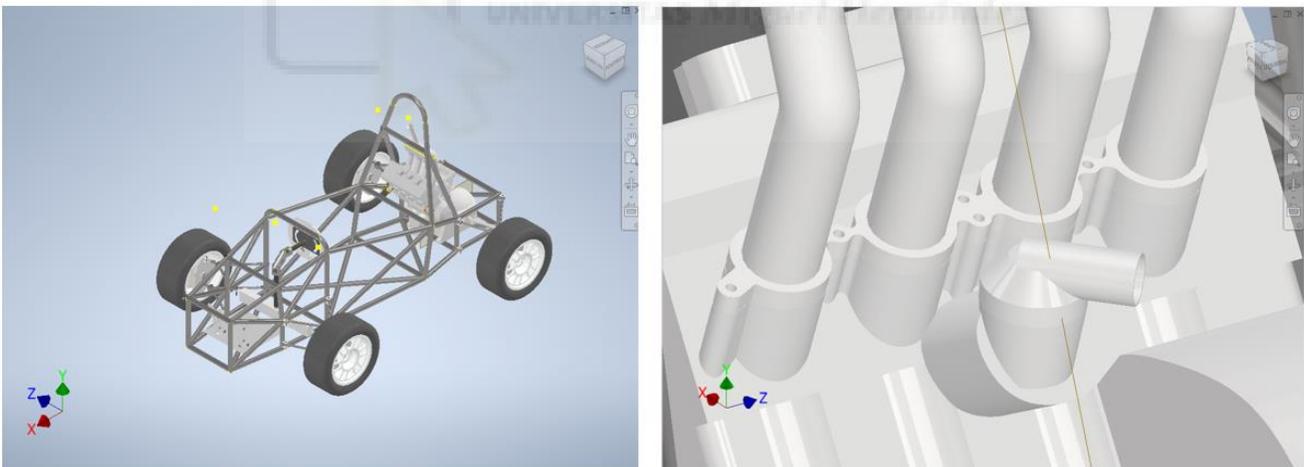


Ilustración 41: Ensamblaje sistema admisión y detalle de su fijación (Fuente: Elaboración propia)

9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La geometría nº 7, cuya longitud de los runners ha sido calculada mediante la ecuación del resonador de Helmholtz y su volumen es 2.25 veces la cilindrada del motor, es la que se ha considerado más óptima para participar en la competición. Ha sido elegida por ser la que mejor se adapta a los requerimientos de los circuitos de la FS. De entre los estudiados, consigue el mejor equilibrio entre potencia y par, siendo la que mejor par ofrece en casi todo el rango de revoluciones (especialmente a bajas revoluciones) e incrementando su potencia hasta las 13000 *rpm*. Las cifras de potencia y par máximo son 99.8 *CV* a 13000 *rpm* y 62.3 *Nm* a 10000 *rpm*, respectivamente.

Además, otras conclusiones a las que se ha llegado mediante este TFG son:

- Para los parámetros de la geometría estudiados, la longitud de los runners tiene una mayor repercusión sobre el comportamiento del motor de la que tiene el volumen del plenum.
- Generalmente, mayor volumen de plenum significa pérdidas en el rendimiento del motor en regímenes altos de giro. Estas pérdidas se deben, principalmente, a los efectos inerciales a los que se ve sujeto el aire y a su mayor tiempo de respuesta a los cambios de presión.
- Longitudes más largas que la de Helmholtz consiguen más potencia en regímenes bajos de velocidad. Sin embargo, se vuelven perjudiciales cuando las revoluciones aumentan y el llenado del cilindro necesita ser más rápido (de nuevo relacionado con la inercia del aire).
- La longitud del resonador de Helmholtz es capaz de producir el mayor par de entre todas las estudiadas, siempre y cuando tenga suficiente volumen de aire encerrado en la cavidad del resonador (plenum).
- El diseño de sistemas de admisión representa un desafío complejo que está influenciado por múltiples factores. Por lo tanto su desarrollo debe ir más allá de la aplicación directa de la ecuación de Helmholtz, considerando también el espacio disponible en el monoplaza, la geometría del plenum, la de los runners, su acoplamiento con otros sistemas o el material a utilizar. A su vez, la longitud de Helmholtz no es un cálculo irrefutable, sino que es superada por otros valores en

determinados rangos de revoluciones. Por esto debe elegirse si la longitud de Helmholtz se adecúa a los requerimientos que debe cumplir nuestro monoplaza u otras longitudes se adecuan más.

A continuación, se describen algunos de los posibles trabajos futuros que se pueden desarrollar a partir de este trabajo de fin grado, así como algunos otros que, por encontrarse fuera del alcance de este documento, deben ser investigados para complementar a este trabajo:

- Incorporar al modelo el sistema de escape que será finalmente utilizado en el monoplaza una vez esté terminado.
- Comparativa en el banco de prueba entre los resultados obtenidos en el programa y los resultados reales. A partir de ello, identificar dónde se desvía y ajustar el modelo para que represente lo más fielmente posible la realidad. Esto permite comprender mejor el funcionamiento del motor y comprender mejor en qué puntos se debe mejorar la configuración de la simulación para que la información que arroja sea más útil.
- Adaptación de la rampa de inyección original para definir el punto óptimo donde se quiere inyectar el combustible. Esto añade al modelo CAD los orificios donde van colocados los inyectores.
- Adición de sensores al modelo (MAP, sonda lambda...). Si se adquieren los datos leídos por los sensores en pruebas reales del motor, se puede conseguir unos *inputs* mucho más precisos para la simulación.
- Para determinar si el comportamiento anómalo a 7000 *rpm* de las geometrías estudiadas viene dado por un punto de transición entre modos de resonancia de las ondas o por un cruce de válvulas contraproducente en ese punto (o una combinación de ellas), se puede utilizar software CFD para observar patrones de flujo a 7000 *rpm*.

ANEXOS

ANEXO 1: MODELADO DE LA GEOMETRÍA

A continuación, se explica cómo se ha procedido para el modelado del plenum en Inventor, así como la creación del volumen interior del sólido necesario para el mallado en WaveMesher. Los datos numéricos corresponden con la geometría de referencia (nº 7).

En primer lugar, se crean distintos planos de control sobre los que se dibujan las secciones buscadas del plenum en la cota en la que se encuentra cada plano. Los planos han sido renombrados como “Plano_control” y su respectivo número para facilitar identificar cada uno de los planos para después variar los parámetros del dibujo. Con estas secciones y utilizando la herramienta de solevado, se consigue la parte superior del plenum.

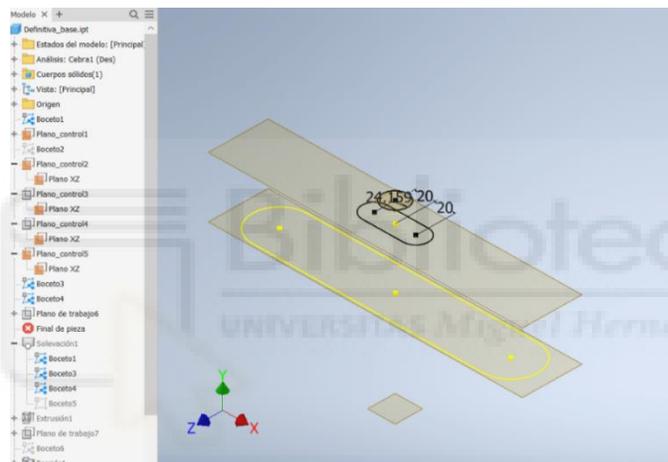


Ilustración 42: Planos de control de las secciones del plenum (Fuente: Elaboración propia)

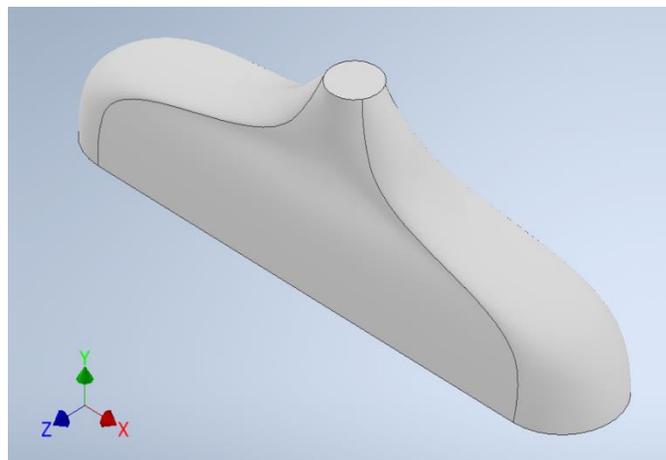


Ilustración 43: Solevado superior del plenum (Fuente: Elaboración propia)

El boceto del último plano de control del solevado superior del plenum tiene la misma forma que el boceto de la tapa inferior del plenum por lo que se puede realizar directamente una extrusión de longitud L_{plenum} . Nótese lo útil de la opción *Administrar > Parámetros >*

Añadir numérico para poder parametrizar longitudes, espesores, diámetros, etc. dentro del programa. En este caso, la extrusión se ha realizado con el valor L_{plenum} , que tiene asignado un valor inicial de 60 mm.

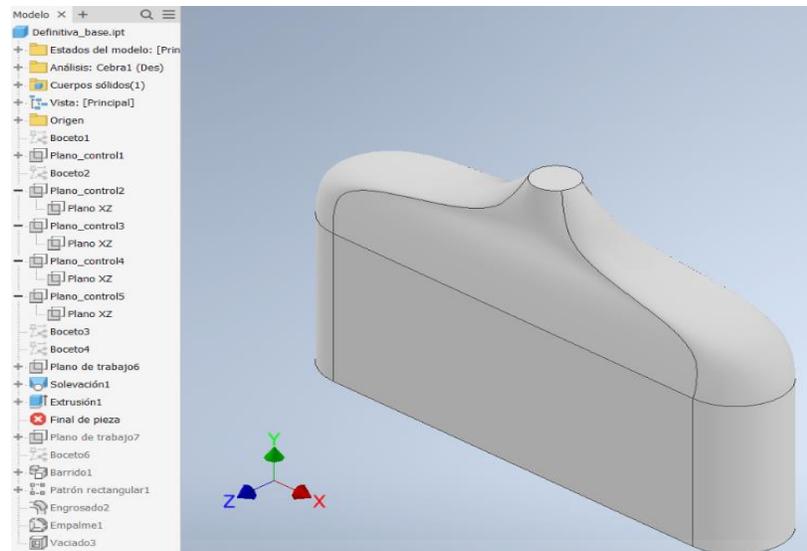


Ilustración 44: Plenum (Fuente: Elaboración propia)

Para continuar con los runners se crea, mediante la opción *Operaciones de trabajo > Desfase*

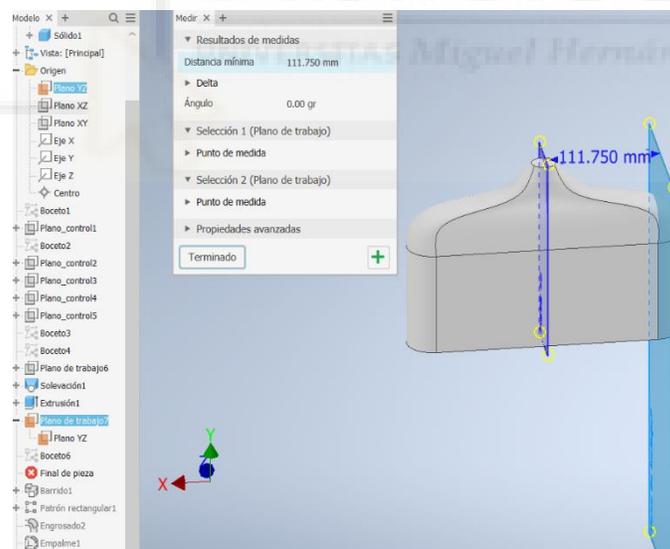


Ilustración 45: Creación plano boceto runners (Fuente: Elaboración propia)

de plano, un plano que sea paralelo al plano YZ de origen y que esté desfasado 111.75 mm. Esta distancia coincide con el centro del diámetro de la salida de los runners. Sobre este plano se dibuja la guía que sirve para el *Barrido* que da forma a los runners. El inicio de esta guía está en ese centro de diámetro de los runners. La distancia entre centros de cada runner es de 74,5 mm. De esta forma, la distancia entre los centros de los runners más alejados entre sí es

de 223,5 mm. Aplicando un *Patrón rectangular* a la operación *Barrido* se consiguen los otros 3 runners.

Con todo ello, se obtiene el sólido de la geometría buscada. No obstante, debe aplicarse la operación de vaciado para eliminar todo el material del interior de la pieza. El grosor seleccionado es de 2 mm. El aspecto de plenum y runners terminados es el siguiente:



Ilustración 46: Forma plenum y runners (Fuente: Elaboración propia)

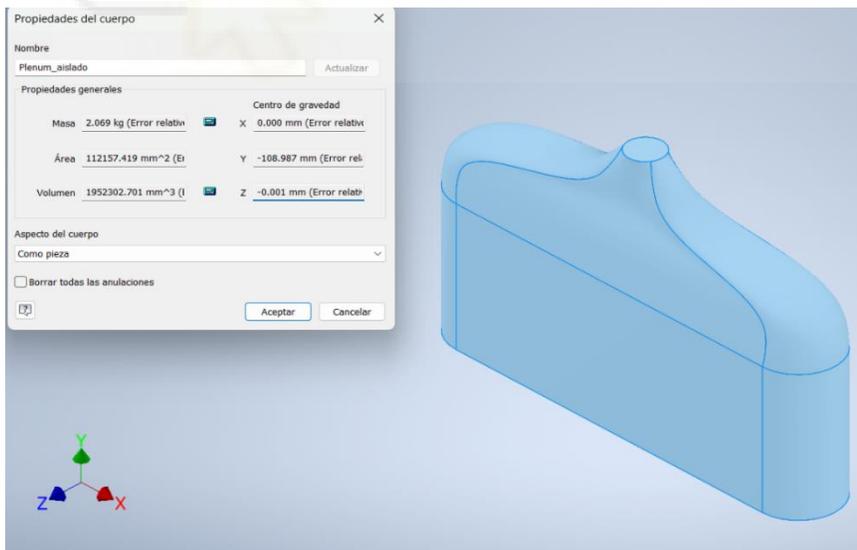


Ilustración 47: Propiedades del plenum (Fuente: Elaboración propia)

Para poder introducir la geometría en el sub-programa WaveMesher, que es el procesador que Ricardo Wave utiliza para las geometrías 3D del modelo, debe crearse su volumen interior hecho sólido. A partir de este “volumen negativo” se realizará el mallado que permite al módulo Wave procesar la geometría a simular. Para obtener el volumen interior se han seguido los siguientes pasos:

1. Abrir la pieza en el entorno de ensamblaje y con la opción *Crear* crear un nuevo componente asegurándose que se selecciona la plantilla adecuada (*Metric\Standard (mm).ipt*) en nuestro caso) y marcar la opción de *Referencia*.

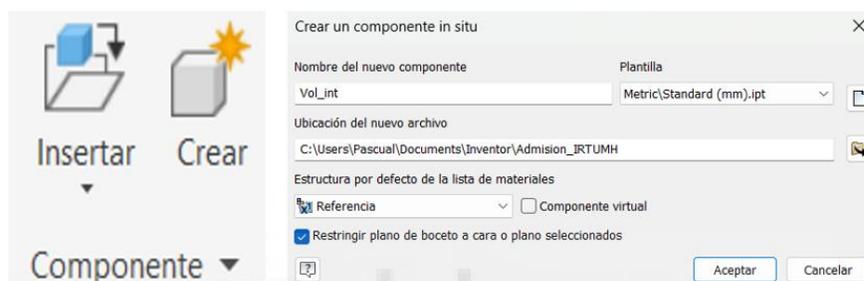


Ilustración 48: Opción "Crear" para realizar el volumen interior (Fuente: Elaboración propia)

2. En la pestaña *Modificar*, seleccionar *Copiar objeto* y clicar el cuerpo del cual queremos hacer el volumen interior y el icono de *Superficie*. Esto crea un cuerpo compuesto por superficies.
3. Utilizando *Suprimir cara* se eliminan todas las superficies exteriores (al tener las paredes de la pieza un grosor determinado – los 2 mm del vaciado - el programa genera una superficie exterior y otra interior).

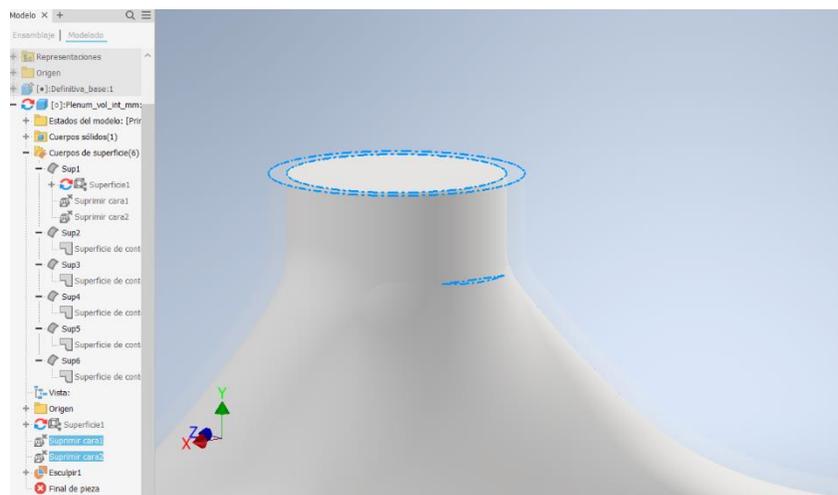
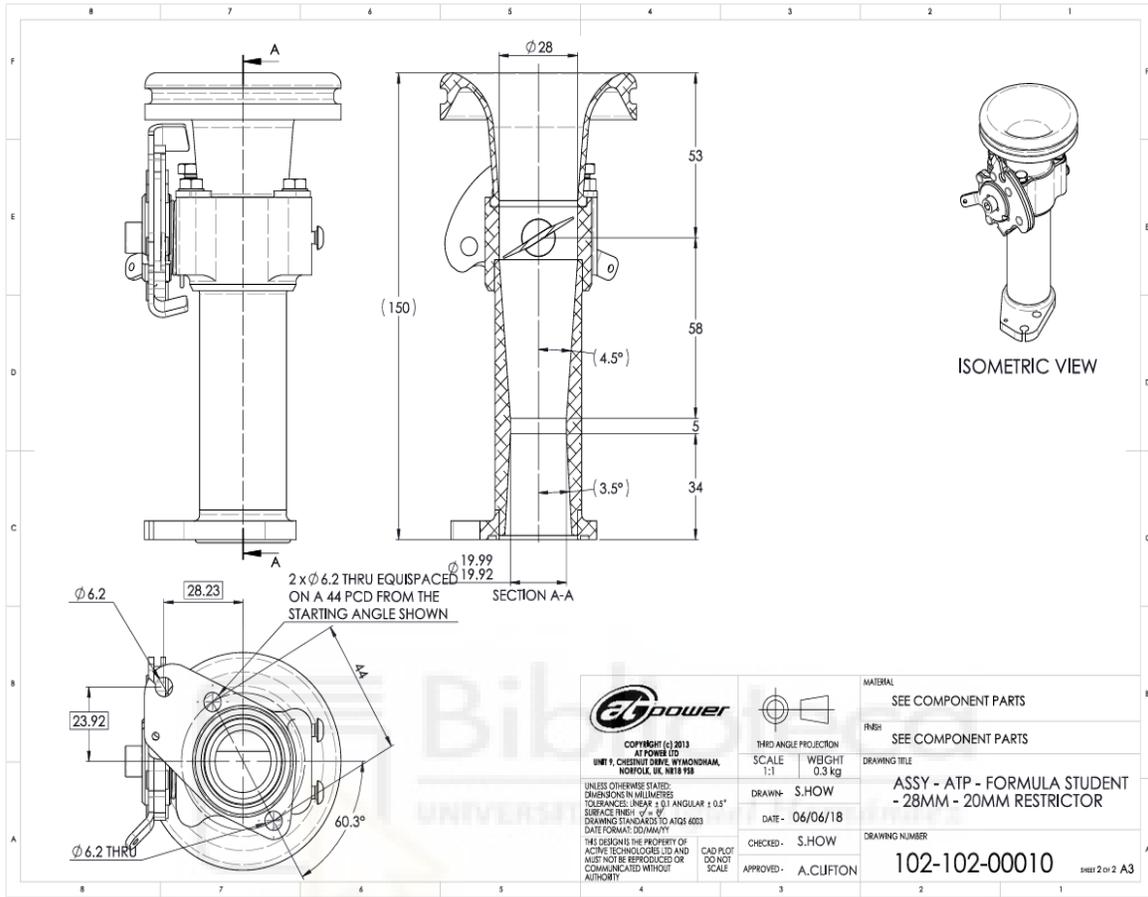


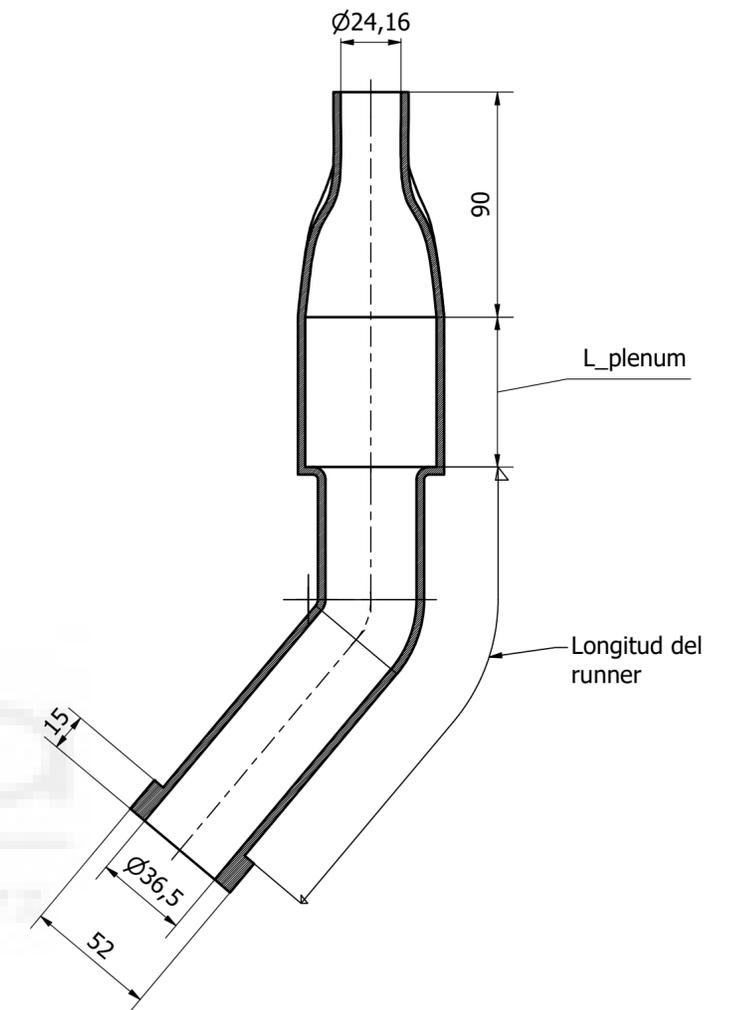
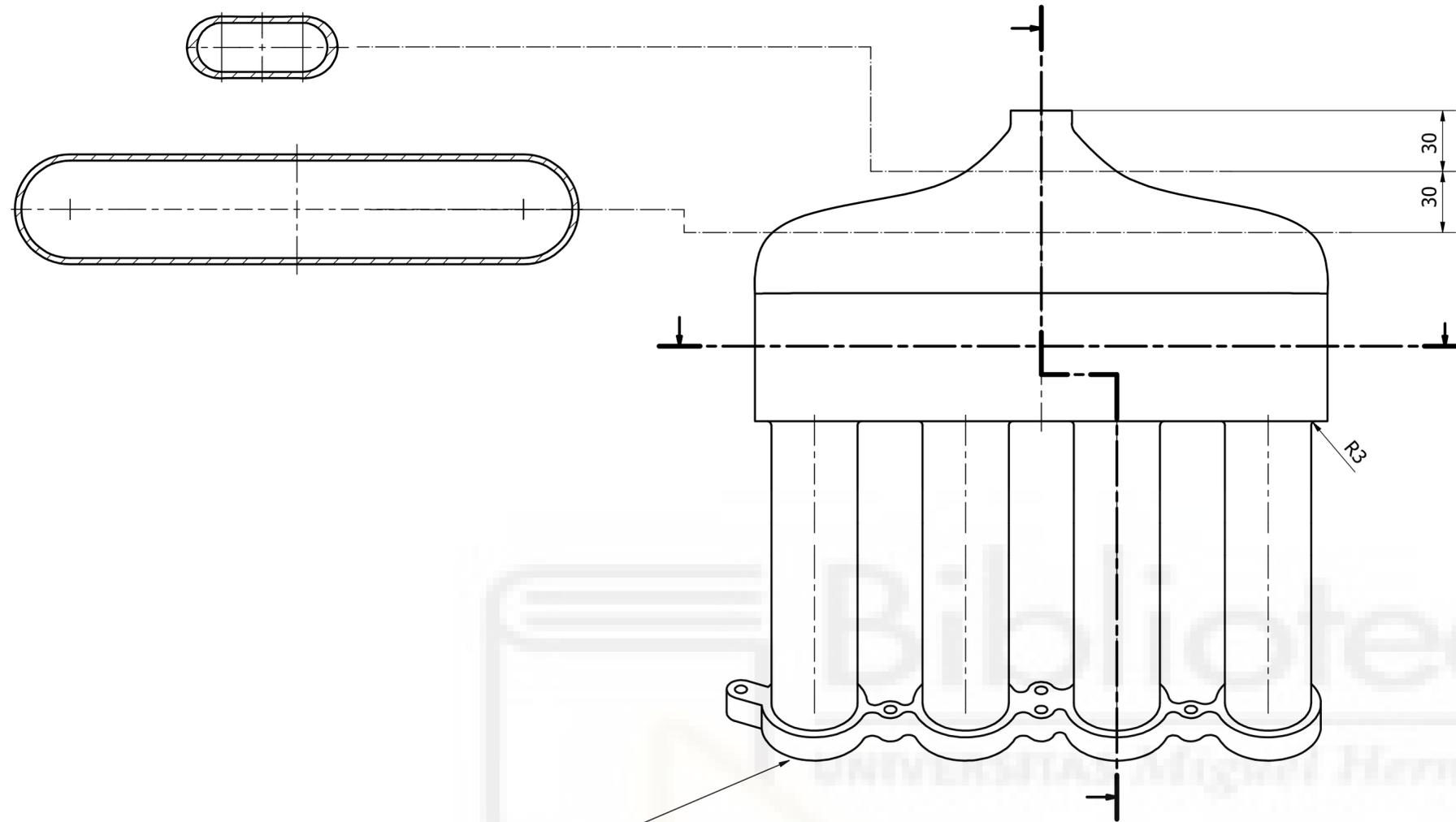
Ilustración 49: Superficies externas eliminadas (Fuente: Elaboración propia)

4. Dentro del apartado *Superficie*, con la operación *Superficie de contorno* se cierra el sólido tanto por la entrada de aire de sección circular que comunica con el restrictor como por el final de los runners. Es importante seleccionar cada superficie de contorno por separado para que el programa no dé error. Por último, con *Esculpir* se selecciona el cuerpo de superficie y se consigue el volumen interior del sólido. Ya está listo para WaveMesher.

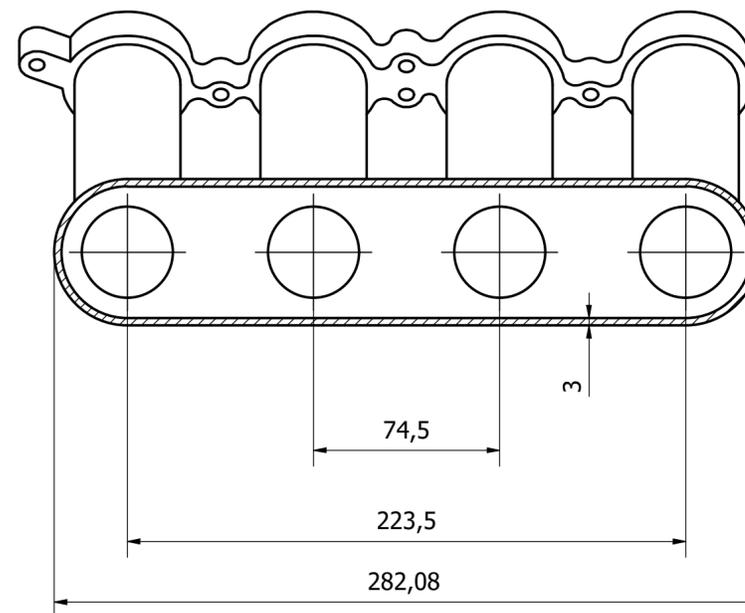


ANEXO 2: PLANOS





Geometría ejemplar sujeción al motor



DISEÑADO POR: Pascual López Gomis	ESCALA: 1:2	FECHA: 07/12/2024	TAMAÑO: A2	
 UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE	PARTE: Plenum y runners		MATERIAL: ABS	
	PRELIMINAR CON ANOTACIONES		HOJA: 1/1	

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Administrative Regulations, A. (s/f). *Formula Student Rules 2024*.
- [2] Wani, D., Sudhakar, A., Bhivate, D., Shinde, A., & Kapdani, A. P. K. (2008). *Design and analysis of air intake manifold for formula student cars*. Irjet.net. <https://www.irjet.net/archives/V10/i12/IRJET-V10I1294.pdf>
- [3] *Blog - emerald Adjustable length intake trumpet development*. (s/f). Emeraldm3d.com. Recuperado el 8 de diciembre de 2024, de <https://www.emeraldm3d.com/articles/emr-adjust-length-intake/>
- [4] E.A.A. Silva, A.A.V. Ochoa, J.R. Henríquez, *Analysis and runners length optimization of the intake manifold of a 4-cylinder spark ignition engine*.
- [5] Rubio, I. S. (2020). *Diseño y fabricación de un airbox para un motor de combustión KTM 690 según normativa de la Formula Student*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- [6] Ranmini Paranawithanage, *CBR600RR Engine with Oil Sump*. Grabcad. Recuperado el 15 de septiembre de 2024, de <https://grabcad.com/library/cbr600rr-engine-with-oil-sump-1-1>
- [7] Lucía, C. (2022, junio 5). *Guía completa: El filamento de ABS en la impresión 3D*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/>
- [8] Faisal. (2023, septiembre 26). *Polyamide 66 (PA66 or Nylon 66) in engine components: Enhancing performance*. Asep Industries.
- [9] *Fabspeed Ferrari 488 Pista style Intake Charge Pipes*. (s/f). Fabspeed Motorsport. Recuperado el 8 de diciembre de 2024, de <https://www.fabspeed.com/fabspeed-ferrari-488-pista-style-intake-charge-pipes/>
- [10] Manual de ayuda de Ricardo Wave.
- [11] Service Manual Honda CBR600 RR 2003-2006.
- [12] López, R. M. (2017). *Diseño óptimo del sistema de admisión de un monoplaza de competición*. Universidad de Sevilla.

- [13] *Admisión variable*. (2024). Hello Auto. <https://helloauto.com/es-es/glosario/admision-variable/>
- [14] Aguilar Rodríguez José Adrian, H. B. P. A. (Septiembre de 2020). *Diseño y análisis del colector de admisión de un motor de encendido provocado para un vehículo de Formula SAE*. Universidad Técnica del Norte.
- [15] Aranda Mauro, R. J. P. (2017). *Sistemas de admisión y escape*.
- [16] Bértolo, J. L. (2022). *Simulación 3D do sistema de admisión dun motor de Formula Student*. Universidad de Vigo.
- [17] Gustavo D. Saralegui, Gastón Pary, Mariano Marconi. (2019). *Parámetros de Semejanza en MCIA*.
- [18] Ilardo, R., & Williams, C. (2010). Design and manufacture of a Formula SAE intake system using fused deposition modeling and fiber-reinforced composite materials. *Rapid Prototyping Journal*, 16, 174–179. <https://doi.org/10.1108/13552541011034834>
- [19] Martí Sanz, C. (2017). *Optimización del cierre de la válvula de admisión de un motor de combustión interna alternativa*. Universidad de Valladolid.
- [20] Oh Yide, A. (2012). *Design and analysis of the intake system of a Formula SAE car*. National University of Singapore.
- [21] Rajput, R. K. (2008). *A textbook of internal combustion engines*. Laxmi Publications.
- [22] Wikipedia contributors. (s/f). *Motor Otto*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Motor_Otto&oldid=159698259
- [23] (S/f-a). Sciencedirect.com. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/helmholtz-resonator>